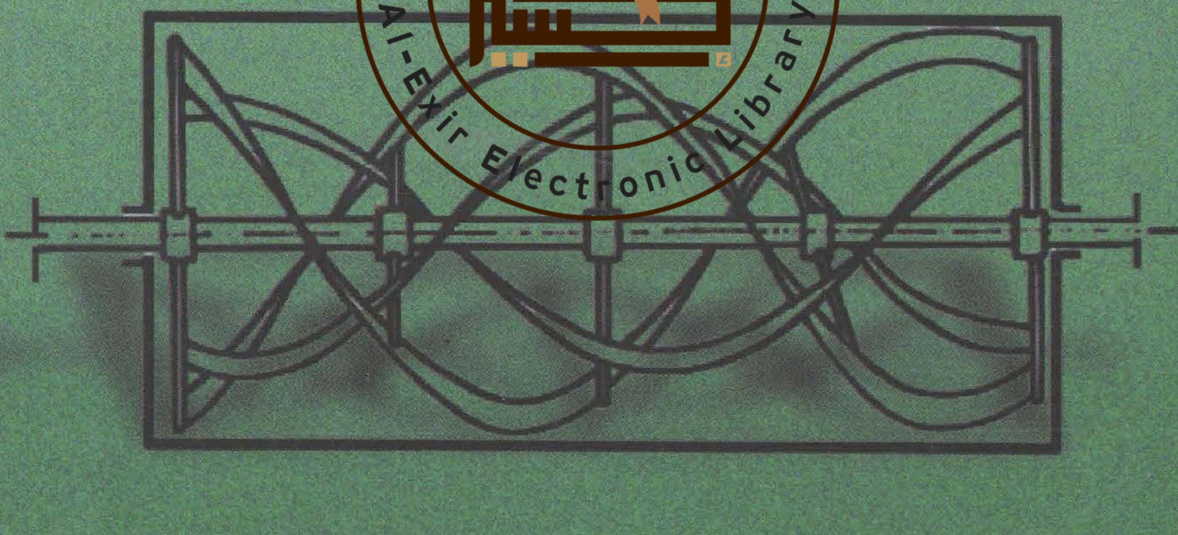
أساسيات
هندسة التصنيع الزراعى

دكتور
أحمد فريد السهريجي



المكتبة الأكاديمية

أساسيات

هندسة التصنيع الزراعى

أساسيات

هندسة التصنيع الزراعى

تأليف

دكتور / أحمد فريد السهريجى

أستاذ هندسة التصنيع الزراعى

كلية الزراعة - جامعة عين شمس

الناشر

المكتبة الأكاديمية

١٩٩٧

المكتبة الأكاديمية

١٢١ ش التحرير ـ الدقى ـ القاهرة

تليفون : ٣٤٨٥٢٨٢/ ٣٤٩١٨٩٠

فاكس : ٣٤٩١٨٩٠ ـ ٢٠٢

رقم الإيداع : ٩٦/١٠٥٠٧

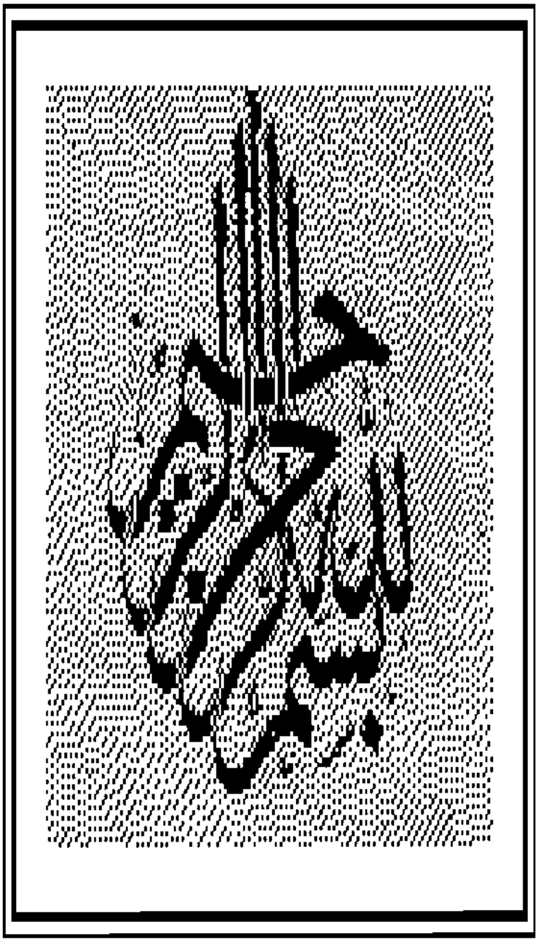
مطابع المكتب المصرى الحديث
MODERN EGYPTIAN PRESS
ت : ٢٢١١٠٧١ - ٢٢١١٠٧٢ - فاكس ٢٢١١٠٧٣

إهداء

إلي

أعتاب رسول اللّه صلي اللّه عليه وسلم

معلم البشر


بسم الله الرحمن الرحيم

بسم الله الرحمن الرحيم

نبذه عن المؤلف

تخرج عام ١٩٥٦ من كلية الهندسه بجامعة الاسكندريه وحصل على ماچستير عام ١٩٦٠ ودكتوراه عام ١٩٦٣ من جامعة كاليفورنيا بأمريكا فى تخصص الهندسه الزراعيه (هندسة تصنيع الأغذيه) . وتدرج فى وظائف هيئة التدريس بكلية الزراعه جامعة عين شمس حيث يشغل حاليا وظيفة استاذ هندسة التصنيع الزراعى منذ أغسطس ١٩٧٤ وعمل رئيسا لقسم علوم الأغذيه من عام ١٩٨٣ حتى عام ١٩٨٩. وقد أعير إلى كل من جامعة الموصل بالعراق عام ٧٠/٦٩ وجامعة الفاتح بطرابلس - ليبيا عام ٧٦/٧٥ وجامعة الملك فيصل بالسعوديه ٧٧/٧٦ حتى ٨٠/٧٩ وذلك لانشاء أقسام للهندسه الزراعيه بكل منها كما عمل مستشاراً لوزير الزراعه السعودى وخبيراً للآلات الزراعيه ٧٣/٧٢ - ٧٤/٧٣ وعمل رئيسا للفريق فى عدد من الدراسات للمنظمه العربيه للتنميه الزراعيه التابعه لجامعة الدول العربيه كما عمل خبيرا لبعض الوقت لكل من المنظمات العالميه FAO، IDRC، UNDP. وعمل مستشاراً لنائب رئيس الوزراء ووزير الزراعه منذ عام ٨٢ حتى الآن حيث قام بإنشاء معهد بحوث الهندسه الزراعيه وإدارة عدد من مشروعات التنميه الزراعيه بتمويل من كل من IDA World Bank, USAID, GTZ, JICA. كما كان عضواً فى مجالس إدارات بعض شركات التنميه الزراعيه والصناعات الغذائيه ، والمطاحن والمضارب . وكان عضوا بالمجالس القوميه المتخصصه (الإنتاج الزراعى) ويقوم حاليا برئاسة شعبة الزراعه الآليه بأكاديمية البحث العلمى والتكنولوچيا .وقد قام بإجراء ونشر عديد من البحوث فى مجالات الهندسه الزراعيه (هندسة تصنيع الأغذيه - الميكنه والآلات الزراعيه) ومثل جمهورية مصر العربيه فى عدد من المؤتمرات الإقليميه والدوليه .

مقدمه

إن الزيادة المضطردة فى الطلب على الغذاء سواء للانسان أو الحيوان يضع عبئاً متزايداً على قطاع الزراعة لتوفيره من خلال محاور متعددة لتنمية الموارد النباتية والحيوانية وأحد هذه المحاور هو تصنيع المنتجات الزراعية والحيوانية وبالأخص الصناعات الغذائية . يصاحب ذلك متطلبات الاستخدام الأمثل للطاقة والحد من الفاقد سواء منها أو من المنتج المصنع مع إيجاد السبل اللازمة لتنفيذ ذلك بتصميم وتصنيع أجهزة ومعدات نظم الصناعات الغذائية المناسبة .

ومن هذا المنطلق فإنه يلزم إعداد الأخصائيين في هذا المجال إعداداً جيداً لإمكان إستخدام التقنيات الحديثة والعمل على تطويرها وتطويع المتقدم منها للوصول إلى منتج عالى الجودة قليل التكاليف بالقدر الممكن .

وقد حرصت في هذا الكتاب على شرح القواعد الأساسية فى مجال هندسة التصنيع الزراعى بطريقة مبسطة تمكن كل من طلبة السنوات النهائية لمرحلة البكالوريوس وطلبة الدراسات العليا سواء لتخصص الصناعات الغذائية والألبان وتخصص الهندسة الزراعية من الالمام الكافى بأساسيات التصميم والتطوير المستمر للاحقة التقدم التكنولوجى فى المجالات البحثية والتطبيقية لتصنيع المنتجات الزراعية.

وكان المدخل الرئيسى لهذا الكتاب هو شرح تفصيلى للأبعاد والوحدات والتركيز على ماهو متفق عليه عالميا من استخدام الوحدات الدولية على أساس مرحلى باستخدام الوحدات المترية وتبسيط طريقة التحويل من نظام إلى آخر . ولتدريب الطالب على ذلك ، اشتملت الأمثلة المحلولة والمسائل العامة والتمرينات على استخدام كلا من النظامين الدولى والمترى .

وقد كان لاستخدام الطاقة الحرارية الإهتمام الكافى نظرا لأنها أصبحت تمثل عامل الندرة والحد من الفاقد فى استخدامها يمثل عاملاً هاماً لزيادة كفاءة التشغيل مع توفير إنتاج عالي الجودة بأقل التكاليف . وعلى هذا الأساس كان لزاما عرض وشرح مبادىء الديناميكا الحرارية والتى بنى عليها تحويل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية وحدود ذلك عند عكس هذا التحويل. وإمتد ذلك لسريان الموائع والغازات المثالية وتغير الضغط الواقع عليها كما هو الحال فى ضواغط الغازات والمراوح والمضخات وما صاحب ذلك من عمليات إنتقال الكتلة والحرارة وقد تم التعرض تفصيلا لسريان الموائع الغير نيوتونية علي أساس أن معظم المواد الغذائية السائلة تتبع ذلك . وقد تم التركيز على حسابات انتقال الحرارة بأشكاله المختلفة

خلال الجوامد والسوائل والغازات وعمليات التبادل الحرارى سواء المستقر أو غير المستقر وتطبيقات ذلك في مجالات التصنيع الغذائى. وأشتمل الكتاب على معالجة المادة العلمية الخاصة بعملية التجفيف وخاصة التجفيف الصناعى وذلك بشرح تداخل إنتقال الرطوبة (الكتلة) والطاقة الحرارية وتأثير ذلك على معدل تجفيف المادة والمدة اللازمة لإحداث ذلك . وكان هناك اهتماما خاصا بعمليات التبريد والتجميد سواء لاجراءات خفض الحرارة أو الحفظ تحت درجات حرارة منخفضة . هذا وقد أخذ فى الاعتبار إمكان إستبدال موائع التبريد التى يتسبب عنها التأثير على البيئة وخاصة إتساع ثقب الأوزون.

وقد عنى الكتاب بإضافة ملحقات تختص بجداول التحويل في القياس وجداول لخصائص البخار وبعض المواد الغذائية الطبيعية والحوارية وكذلك الخرائط السيكرومترية وإنتقال الحرارة وخرائط التبريد والتجميد بما يساعد الطالب للحصول علي البيانات اللازمة في عمليات التصنيع الغذائي .

ويود المؤلف أن يعبر عن خالص شكره وعظيم تقديره للأخ الاستاذ الدكتور حمدى عبد اللطيف حسانين والأخ الدكتور هانى إدريس خليل على مابذلاه من جهد ووقت فى المراجعه والترتيب لكى يخرج هذا الكتاب بالشكل الواضح والجيد . وكذلك للسيده /سامية عبد الحليم أحمد لقيامها بكتابة هذا الكتاب علي جهاز الحاسب الشخصى وعلى صبرها في إجراء التصحيحات المتعددة . هذا ويود المؤلف تقديم الشكر كل الشكر للأخوة الأبناء العاملين بقسم التصميم والتطوير بمعهد بحوث الهندسه الزراعيه لإخراج الرسومات والمقاطع المختلفه تحت اشراف دكتور عاطف حمام سليمان.

ويأمل المؤلف أن يكون هذا الكتاب عونا ومفيداً للطلبه الدارسين لهندسة التصنيع الزراعى وكذلك الأخوه والزملاء العاملين فى المجال التطبيقى فى الصناعات الغذائيه والألبان .

القاهرة/ اكتوبر ١٩٩٦ — أ.د. أحمد فريد السهريجى

المحتويات

الباب الاول

الأبعاد والوحدات الهندسية

Engineering Dimensions and Units

فى بداية أى دراسه هندسيه يجب الالمام بموضوع الابعاد والوحدات المستخدمه للتعبير عن المقادير الطبيعيه التي تستخدم فى الدراسات الهندسيه وكذلك معرفة كيف يمكن اجراء التحويلات بين الوحدات المختلفه .

الأبعاد Dimensions

يستخدم الاصطلاح (بعد) Dimension للتعبير عن نوع كمية طبيعيه معينه ولذلك فانه على سبيل المثال نجد أن الطول ، المساحه ، الحجم ، الزمن ، القوه الكتله ، السرعه ، درجة الحراره ، الطاقه ، الشحنه الكهربيه ...الخ جميعها ابعاد مختلفه ومن الواضح انه يمكن التعبير عن بعض هذه الابعاد باستخدام ابعاد اخرى ولذلك فان بعض الابعاد يعتبر مشتق والبعض الآخر يعتبر بسيط أو اساسى والمجموعه الاخيره هى التى لايمكن التعبير عنها باستخدام ابعاد اخرى مثل الوقت والطول فى حين نجد انه على سبيل المثال البعد (المساحه) يمكن التعبير عنها كمربع لبعد الطول والسرعه يمكن التعبير عنها كحاصل قسمة البعد بين الطول علي الزمن واذا رمزنا للمساحه بالرمز [A] ، الطول بالرمز [l] ، السرعه بالرمز [V] ،الزمن بالرمز [θ] فان المعادلات التاليه توضح التعبير عن الابعاد المشتقه باستخدام الابعاد البسيطه :-

المساحه $[A] = [l^2]$

السرعه $[V] = [l/\theta]$

الوحدات Units

يستخدم الاصطلاح (وحده) Unit لقياس حجم او مقدار كمية بعد معين ولذلك فان البوصه ، القدم ، السنتيمتر ، الميل جميعها وحدات لقياس بعد الطول. ونجد ان البيانات الهندسيه يمكن الحصول عليها في عدة وحدات وتوجد علاقات محدده بين الوحدات الخاصه لـ (بعد) معين وباستخدام تلك العلاقات يمكن التحويل بين وحدة الى اخرى . وعلى سبيل المثال اذا كان لدينا الكميه ٦٠ ميل/ساعه ويراد تحويلها الي قدم/ثانيه فنلاحظ ان كلا من الوحدتين ميل/ساعه ، قدم/ثانيه تستخدم لقياس الـ (بعد) السرعه ولاجراء هذا التحويل يجب ان نحصل اولا علي العلاقه المحدده بين كل من الميل والقدم وكذلك بين الساعه والثانيه واذا علمنا أن هذه العلاقات هى كما يلي :-

١ ميل = ٥٢٨٠ قدم ، ١ ساعه = ٣٦٠٠ ثانيه

ومن تلك العلاقات نحصل علي مايلى:

٥٢٨٠ قدم/ميل = ١ ، ٣٦٠٠ ثانيه/ساعه = ١

وحيث ان عوامل التحويل الاخيره مساويه للوحده فان أى كميه يمكن ضربها أو قسمتها عليها دون ان يحدث تغيير فى قيمتها ولذلك فان تلك العوامل يمكن استخدامها بالطريقه التي تؤدى إلى اختصار الوحدات غير المرغوبه فيتبقى الوحدات المرغوبه كما يلى :

(٦٠ ميل/ساعه).(٥٢٨٠ قدم /ميل) . (١ساعه/٣٦٠٠ ثانيه) = ٦٠ × ٥٢٨٠ قدم/٣٦٠٠ ثانيه = ٨٨ قدم/ثانيه

ويوجد جداول خاصه بعوامل التحويل

نظم القياس Systems of Measurement

كما هو معروف أنه يمكن التعبير عن (بعد) معين بعدة وحدات ولذلك فيوجد عدة نظم للتعبير عن الوحدات حيث يمكن تقسيمها الي مجموعتين الأولي تعرف بالنظم الانجليزيه والاخري تعرف بالنظم المتريه وتضم كل مجموعه نظامين احدهما شائع الاستعمال في الاغراض العلميه والاخر شائع الاستعمال في الاغراض الصناعيه ومما يذكر ان وحدات كلا من الطول والكتله والزمن وحدات اساسيه بينما وحدات القوه تكون مشتقه فيما عدا النظم الانجليزيه والامريكيه الهندسيه تكون فيها وحدات القوه هي وحدات أساسيه وتصبح وحدات الكتله هي الوحدات المشتقه ولقد وجد أن وجود عدة وحدات تعبر عن (بعد) معين يؤدي الي شيء من الارتباك مما أدي الي ظهور نظام جديد عام اقترح استخدامه في كل من الأغراض العلميه أو الصناعيه دوليا ليحل محل النظم الانجليزيه والمتريه ويعرف هذا النظام باسم النظام الدولي ويرمز له بالرمز SI وهي الحروف الأولي من كلمات النظام الدولى باللغه الفرنسيه وتم اعداد هذا النظام في عام ١٩٦٠ بواسطة مؤتمر عام للموازين والمقاييس وان كان هذا النظام يعتبر نظام مترى ويوضح جدول رقم (١-١) مقارنة لوحدات بعض الابعاد في النظم المختلفه بما فيها النظام الدولي SI.

جدول رقم (١-١) نظم المقاييس (النظم الأنجليزيه)

	الانجليزى المطلق British Absolute	الانجليزى الهندسى British Engineering	الامريكى الهندسى American Engineering
الاستخدام	علمى	صناعى	صناعى امريكى
الطول	قدم	قدم	قدم
الكتله	رطلكتله	صلاج Slug	رطلكتله
الزمن	ثانيه	ثانيه	ثانيه
درجة الحراره	°ف	°ف	°ف
القوه	باوندال	رطل قوه	رطل قوه
الطاقه	و.حـ.ب	و.حـ.ب	و.حـ.ب
	قدم باوندال	قدم رطل قوه	قدم رطلقوه
مقلوب ثابت	١ رطل كتله·قدم	١ صلاج قدم	١٧٤ر٣٢ رطل كتله·قدم
معادلةنيوتن	باوندال. ثانيه^{2}	رطل قوه ثانيه^{2}	رطل قوه .ثانيه^{2}

النظم المتريه

	سم.جم.ث C.G.S	م.كجم.ث M.KS	الدولى S.I
الاستخدام	علمـــى	صناعى	عـــام
الطول	سنتيمتر	متـــر	متـــر
الكتله	جـــرام	كيلوجرام	كيلوجرام
الزمن	ثانيـــه	ثانيـــه	ثانيـــه
درجةالحراره	°م	°م	°ك
القوه	داين	كجم قوه	نيوتن
الطاقه	كالورى ، أرج	كيلو كالورى ، جول	جول
مقلوب ثابت	١ جم .سم	٨٠٧ر٩ كجم كتله·متر	١ كجم متر
معادلةنيوتن	داين.ثانيه^{2}	كجم قوه .ثانيه^{2}	نيوتن .ثانيه^{2}

النظام الدولي للوحدات SI System

يعتمد هذا النظام علي اتخاذ وحدة كقاعده للتعبير عن (بعد) معين ويمكن تكبيرها أو تصغيرها باضافة (بادئه) مناسبه لاسم الوحده المستخدمه والبادئه المستخدمه هي لمضاعفات الرقم عشره فعلى سبيل المثال تتخذ الوحده (متر) كقاعده للتعبير عن الطول ويمكن تكبيرها باضافة البادئه (كيلو) فتصبح كيلومتر كما يمكن تصغيرها باضافة البادئه (ميللى) فتصبح ميللى متر الا انه يجب ملاحظة انه لايمكن اضافة بادئتين معا على القاعده كما يجب اختيار البادئه قبل الوحده التى تجعل الرقم المذكور يقع فى المدى من ١ر٠ إلى ١٠٠٠ وفيما يلى بعض الأمثله :-

- يجب التعبير عن ١٠٠٠٠ سم بالقيمه ١٠٠ متر ولايمكن التعبير عنها بالقيمه ١٠ كيلو سم بالرغم من ان كلا الرقمين يقع في المدى المذكور الا أن الرقم الاخير يحتاج إلى استخدام بادئتين هما (كيلو) ، (سم) .
- يجب التعبير عن ١٠٠٠٠٠ر٠ متر بالقيمه ١ ميكروميتر.
- يمكن التعبير عن ١٠٠٠٠ نيوتن/متر^{٢} بالقيمه ١٠ كيلو باسكال ولايمكن التعبير عنها لـ ١٠ كيلو نيوتن/متر^{٢}.
- لايمكن التعبير عن ٢٠٠٠ متر^{٢} بالقيمه ٢ كيلو متر ^{٢} .

والجدول رقم (١-٢) يوضح أهم الوحدات الاساسيه والمشتقه في النظام الدولى.

تحويل الابعاد Conversion of Dimensions:

يتضح من التعريف المذكور من قبل للأصطلاح (بعد) انه لايمكن تحويل بعد الي أخر فلايمكن تحويل البعد (طول) الي البعد (مساحه) وهذا صحيح دائما الا في حالة كل من البعد (الكتله) والبعد (القوه) نظرا لوجود علاقه بينهما فيما يعرف بقانون نيوتن الثاني وبالتالي فباستخدام معامل خاص كما سيتضح من المناقشه التاليه يمكن احلال كلا من البعدين (الكتله والقوه) كلاهما محل الآخر . فمن قانون نيوتن الثاني الذي يدل على ان القوه تتناسب مع حاصل ضرب الكتله والعجله ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا بالمعادله التاليه :-

القوه = ثابت التناسب × الكتله × العجله .

جدول رقم (١-٢)

بعض الوحدات الاساسيه والمشتقه فى النظام الدولى

البعد	إسم الوحده	رمزها	تكوينها
الطول	متر	م (m)	-
الكتله	كيلوجرام	كجم (kg)	-
التيار الكهربائى	أمبير	امبير (A)	-
درجة الحراره	كلفن	كلفن (K)	-
كمية المادة	مول	مول (mol)	-
الزمن	ثانيه	ث (s)	-
القوه	نيوتن	نيوتن (N)	كجم.م/ث^{٢}
الطاقه ، الشغل كمية الحراره	جول	جول (J)	نيوتن.م
القدره	وات	وات (W)	جول/ث
الجهد الكهربى،القوه الدافعه الكهربيه	فولت	فولت (V)	وات/امبير
المقاومه الكهربيه	أوم	أوم (ohm)	فولت/امبير
الضغط	باسكال	باسكال (Pa)	نيوتن/م^{٢}

وبالتالى فان وحدات ثابت التناسب هى وحدات [القوه/(الكتله × العجله)]
أي وحدات [(قوه × مربع الزمن)/(الكتله × الطول)]

وتتوقف القيمه العدديه لثابت التناسب على الوحدات المستخدمه للتعبير عن الابعاد :- الكتله ، القوه ، الطول ، الزمن .

وعندما يكون لدينا كتله مقدارها ١رطل وخضعت لقوة الجاذبيه الأرضيه فاننا نحصل علي قوة مقدارها رطل$_{\text{قوه}}$ وبالتعويض في قانون نيوتن الثاني فان:-

١ رطل $_{\text{قوه}}$ = ثابت التناسب × ١ رطل $_{\text{كتله}}$ × ١٧ر٣٢ قدم/الثانيه ^{٢}
وبالتالى فانه :-

١/ثابت التناسب = ١٧ ، ٣٢ رطل $_{\text{كتله}}$ قدم/رطل $_{\text{قوه}}$ ثانيه^{٢}

ولما كانت القيمه العدديه لمقلوب ثابت التناسب متساويه عدديا فقط مع القيمه العدديه للجاذبيه الارضيه فانه يرمز لمقلوب ثابت التناسب بالرمز g_c حيث يرمز للجاذبيه الارضيه بالرمز g ويجب ان يكون واضحا ان وحدات الـ g_c تختلف تماما عن وحدات البعد (عجله) والجدول رقم (١) يوضح وحدات مقلوب ثابت تناسب قانون نيوتن الثانى وقيمته العدديه فى النظم المختلفه للوحدات . ومما هو جدير بالذكر انه عند ضرب أو قسمة أى قيمه بالثابت g_c فإن قيمتها لا تتغير ولذلك فهو يستخدم عندما يكون المرغوب فيه احلال أى من الكتله أو القوه كلاهما محل الآخر وبمعنى آخر فان g_c يعتبر احد معاملات التحويل وهو يساوى الوحده شأنه فى ذلك شأن المعامل ٦٠ ثانيه/دقيقه أ، ١٢ بوصه/قدم أ، الخ

تحويل الوحدات Conversion of Units

عند كتابة القيمة العدديه لأى (بعد) فان أهميته أو قيمته الحقيقيه لن تتضح الا اذا ذكرت الوحدة المميزه له ولذلك اذا تم التعويض في احدى المعادلات بالقيم العدديه متبوعه بوحداتها فاننا نحصل على معادله تعرف باسم المعادله البعديه The Dimensional Equation وفى مثل تلك المعادلات فان الوحدات تعامل معامله الرموز الجبريه من حيث العمليات الحسابيه وبمعني آخر فان جميع العمليات الحسابيه التى تجرى علي القيم الرقميه يتم اجرائها ايضا على الوحدات

ولذلك فان (٤ متر)^{٢} = ١٦ متر^{٢}

٥ (جول/كيلوجرام .درجة كلفن) ×١٠ كيلوجرام × ٥ درجة كلفن

= ٥ × ١٠ × ٥ جول . كيلوجرام . درجه كلفن = ٢٥٠ جول

كيلو جرام . درجة كلفن

وعندما يكون المطلوب تحويل وحدة الي أخرى لنفس (البعد) فإنه يمكن استخدام معادله بعديه لاجراء ذلك التحويل حيث تكتب معادله أحد طرفيها الوحده المطلوبه في الطرف الايمن والطرف الاخر به الوحده الموجوده المطلوب تحويلها مضروبه في معامل التحويل المناسب وعندئذ يتم الحصول علي معامل التحويل المناسب الذى باستخدامه يؤدى الي اختصار الوحدات الواجب التخلص منها وظهور الوحدات المطلوب الحصول عليها كما في المثال التالي :-

المطلوب تحويل وحدة حرارية بريطانيه/رطل درجه فهرنهيتيه الي جول/جرام درجة كلفن .

جول/جرام درجة كلفن = وحدة حراريه بريطانيه/رطل درجة فهرنهيتيه × معامل التحويل المناسب

وبفحص طرفي المعادله نجد ان البسط يحتوى علي جول في الطرف الأيمن وعلى وحده حراريه بريطانيه في الطرف الايسر ولذلك يجب الحصول علي معامل التحويل بينهما وكذلك نجد ان المقام في الطرف الايمن يحتوى على جرام درجة كلفن بينما الطرف الايسر يحتوى المقام على رطل درجة فهرنهيتيه ولذلك يجب الحصول علي معامل التحويل من رطل الى جرام ومعامل التحويل من درجة كلفن الى درجة فهرنهيتيه . ويجب ان تكون وحدات المعاملات المطلوب الحصول عليها هى جول/وحده حراريه بريطانيه ، رطل/جرام ، درجه فهرنهيتيه/درجة كلفن. وعند البحث فى جداول معاملات التحويل قد نجد معاملا وحداته وحده حراريه بريطانيه/جول أي مقلوب الوحدات المطلوبه فيستخدم فى هذه الحاله مقلوب ذلك المعامل المتاح حتى يتم الاختصار المطلوب فى المعادله البعديه ولذلك فان المعامل المطلوب هو ١٠٥٤٫٨ جول/وحده حراريه بريطانيه فاذا لم يكن متوافر وكان المعامل الموجود هو ٩٫٤٨ × ١٠$^{-٤}$ وحده حراريه بريطانيه/ جول فانه يتم التعويض بمقلوبه أي بالقيمه جول/٩٫٤٨ × ١٠$^{-٤}$ وحده حراريه بريطانيه.

- بالنسبه للمعامل الثاني هو ١٫٠٤٦ر١ × ١٠$^{-٣}$ رطل/جرام أو رطل/٦ر٤٥٣ جرام والمعامل الثالث هو ٨ر١ درجة فهرنهيتيه/درجة كلفن ويجب ملاحظة أن العلاقه هنا بين درجة فهرنهيتيه ودرجه كلفن هى العلاقه على المقياس نفسه والآن بعد الحصول على معاملات التحويل المطلوبه فبالتعويض بهما فى المعادله البعديه السابق كتابتها نحصل علي التحويلات المطلوبه كما يلي:-

جول/جرام . درجه كلفن = (وحده حراريه بريطانيه/رطل درجه فهرنهيتيه) × (٨ر١٠٥٤ × ١٫٠٤٦ر١ × ١٠$^{-٣}$ × ٨ر١).

∴ جول/جرام . درجة كلفن = (وحده حراريه بريطانيه/رطل . درجه فهرنهيتيه) × (١٨٥ر٤).

احيانا مانجد ان المطلوب تحويل وحدة مشتقه الى أخرى لنفس (البعد) ولانجد لدينا معامل التحويل المناسب بينهما متوافر ففى هذه الحاله يجب ارجاع الوحدات المشتقه أو التعبير عنها بما يكافؤها من وحدات بسيطه حسب تعريف تلك الوحده المشتقه وعندئذ يمكن استخدام معاملات التحويل المتوفره بين الوحدات البسيطه لإجراء التحويل المطلوب والمثال الآتي يوضح ذلك :-

المطلوب تحويل وحدة حراريه بريطانيه الي كيلووات ساعه؟
كيلووات ساعه = وحده حراريه بريطانيه × معامل التحويل المناسب.
يجب ملاحظة ان الوات هى وحدة القدره في النظام الدولى وهى إسم يطلق على(جول/ثانيه)، ومن العلاقات التاليه يمكن الحصول على المعاملات المطلوبه :-

كيلووات = ١٠٠٠ وات ∴ كيلووات/١٠٠٠ وات = ١

وات = جول . ثانيه$^{-١}$ ∴ وات/جول ثانيه$^{-١}$ = ١

ساعه = ٣٦٠٠ ثانيه ∴ ساعه/٣٦٠٠ ثانيه = ١

وحده حراريه بريطانيه = ٨ر١٠٥٤ جول ∴ ٨ر١٠٥٤ جول/وحده حراريه بريطانيه = ١

∴ كيلووات ساعه =وحدة حراريه بريطانيه × $\frac{١}{١٠٠٠}$ × $\frac{١}{٣٦٠٠}$ × ٨ر١٠٥٤

= وحده حراريه بريطانيه × ٩٢٨ر٢ × ١٠$^{-٤}$

- احيانا مانجد أن المطلوب تحويل وحدة الى أخرى لنفس (البعد) إلا أن احداهما تحتوى على وحده كتله والأخرى تحتوى على وحدة قوه ففى هذه الحاله نستخدم مقلوب ثابت معادله نيوتن السابق ذكره مع احدى الوحدتين

حتـــى يتم ظهور الكتله فقط أو القوه فقط في كلا طرفى المعادله البعديه وبعد ذلك يتم اجراءات التحويل كماسبق ذكره والمثال الآتى يوضح ذلك :-

* المطلوب تحويل رطل قوه الي وحدات القوه فى النظام الدولى ؟

لما كانت القوه هى حاصل ضرب الكتله فى العجله فانه يمكن الحصول على وحدات القوه فى النظام الدولى وهى كيلوجرام . متر/ثانيه٢ ويطلق عليها نيوتن وبالتالى فالمعادله البعديه هى :-

كيلوجرام . متر/ثانيه٢ = رطل قوه × معامل التحويل المناسب .

فى هذه الحاله يجب استخدام معامل التحويل g_c بالضرب فيه حتى يمكن اخفاء وحدة رطل قوه واظهار وحدة الكتله رطل كتله بدلا منها حيث

g_c = ١٧٤ر٣٢ قدم رطل كتله/رطل قوه ثانيه ٢ .

وعندئذ سنجد ان طرفى المعادله تحتوى على وحدات كتلة وطول وزمن ولما كان وحدة الزمن هى الثانيه فى طرفى المعادله فاننا نحتاج إلى معاملين تحويل يمكن الحصول عليهما كما يلي :-

١ رطـــــــل = ٥٣٥٩ر٤ × ١٠^-١ كيلوجرام ∴ ٥٣٥٩ ٤ × ١٠^-١ كيلوجرام/رطل كتله = ١

١ قدم = ٠٤٨ر٣ × ١٠^-١ متر ∴ ٠٤٨ر٣ × ١٠^-١ متر/قدم = ١

بالتعويض فى المعادله البعديه نحصل على :-

كجم متر/ثانيه٢ = رطل قوه × ١٧٤ر٣٢ × ٤٥٣٥٩ر × ٣٠٤٨ر

= رطل قوه × ٤٤٨ر٤

∴ نيوتن = رطل قوه × ٤٤٨ر٤

* وفيما يلى مثال أخر :-

المطلوب تحويل وحدة الضغط رطلقوه/بوصه٢ الى باسكال واذا علمت أن الضغط الجوى يساوى ٧ر١٤ رطلقوه/بوصه٢ فما قيمة الضغط الجوى بوحدات الباسكال؟

تعتبر الوحده باسكال وحدة مشتقه للضغط فى النظام الدولى فيجب كتابتها بصوره تحتوى على وحدات اساسيه باستخدام تعريفها كما يلى :-

باسكال = نيوتن/متر٢ ، نيوتن = كيلوجرام . متر/ثانيه٢

∴ باسكال = كيلوجرام . متر/متر^{٢} ثانيه^{٢}

= كيلوجرام/متر ثانيه^{٢}

والآن يمكن كتابة المعادله البعديه حيث تكتب الوحده المطلوب التحويل إليها فى الطرف الايمن:-

كيلو جرام/متر ثانيه^{٢} = رطل$_{قوه}$/بوصه^{٢} × معامل التحويل المناسب.

والآن نحصل على معاملات التحويل اللازمه فنجد أنه يلزم معامل التحويل g_c ويجب الضرب فيه حتى يحل رطل $_{كتله}$ بدلا من رطل$_{قوه}$ ومن العلاقات التاليه يمكن الحصول على المعاملات الأخرى المطلوبه :-

قدم = ١٢ بوصه	∴ ١٢ بوصه/قدم = ١
متر = ٣٧ر٣٩ بوصه	∴ ٣٧ر٣٩ بوصه/متر = ١
رطل $_{كتله}$ = ٤٥٣٥٤ر. كيلوجرام	∴ ٤٥٣٥٤ر كيلوجرام/رطل $_{كتله}$ =١

ويلاحظ ان الضرب فى المعامل ١٢ بوصه/قدم يؤدى الى اختصار البوصه المربعه التي فى مقام الوحده المطلوب تحويلها الى بوصه فقط ، ثم استخدام المعامل ٣٧ر٣٩ بوصه/متر يؤدى الى احلال المترفى المقام بدلا من البوصه أما المعامل الأخير وهو ٤٥٣٥٤ر. كيلوجرام/رطل $_{كتله}$ يؤدى الى احلال الكيلوجرام بدلا من الرطل $_{كتله}$ الذى ظهر لاستخدام المعامل g_c وبالتعويض عن تلك المعاملات في المعادله البعديه ينتج :-

كيلوجرام/متر .ثانيه^{٢} = رطل $_{قوه}$/بوصه^{٢} × ١٧٤ر٣٢ × ١٢ × ٣٧ر٣٩ × ٤٥٣٥٤ر.

= رطل $_{قوه}$/ بوصه ^{٢} × ٩٣٧ر٦٨٩٣

∴ باسكال = رطل $_{قوه}$ /بوصه^{٢} × ٩٣٧ر٦٨٩٣

وهذا يعنى أنه للتحويل من رطل $_{قوه}$/بوصه^{٢} الي باسكال يجب الضرب فى معامل التحويل الذى تم الحصول عليه ٩٣٧ر٦٨٩٣.

لذلك فان قيمة الضغط الجوى ٧ر١٤ رطل $_{قوه}$/بوصه^{٢} اذا ضربت فى هذا المعامل نحصل على قيمة الضغط الجوى بالوحدات الدوليه (باسكال) كما يلى :

الضغط الجوى = ٧ر١٤ رطل $_{قوه}$/بوصه^{٢} × ٩٣٧ر٦٨٩٣

= ١٠١٣٤٠ باسكال

= ١٠١ كيلو باسكال

التجانس البعدى للمعادلات Dimensional Consistency of Equations:-

نلاحظ ان المعادلات الصحيحه يجب ان تكون متجانسه بعديا وبمعنى آخر فيجب ان تكون الابعاد متماثله في كل من الطرفين وعند استخدام معادله لأول مره ويكون المطلوب معرفة وحدات احد المتغيرات بها فيمكن كتابة المعادله على هيئة معادله بعديه ونتيجة لتجانس الطرفين يمكن معرفة الوحدات المناسبه لهذا المتغير والأمثله التاليه توضح ذلك :-

المطلوب معرفة وحدات معامل الانتقال الحرارى بالحمل فى النظام الدولى فى المعادله التاليه

$$Q = hA \ \Delta T$$

نلاحظ ان (Q) هى معدل الانتقال الحرارى وبالتالى فلها وحدات طاقه/زمن أى ان وحداتها في النظام الدولى هى جول/ثانيه (J/s) والمعروفه بالاسم وات (W) أما (A) فهى المساحه وبالتالى فوحداتها فى النظام الدولى متر٢ (m^2) أما (ΔT) فهى الفرق فى درجات حرارة ووحداتها فى النظام الدولى درجة كلفن (K) وبالتعويض بالوحدات فى المعادله السابقه نحصل على المعادلات البعديه التاليه :-

$$Q\ (W) = h\ (\quad)\ A\ (m^2)\ \ \Delta T\ (K)$$

وبضم القيم العدديه المختلفه بالمتغيرات المختلفه فى المعادله فى جانب واحد نحصل على :-

$$W = (\quad)\ (m^2)\ (K) \times hA\,\Delta T/Q$$

والقوس الذى لايحتوى على شيء يجب ان يحتوى على وحدات الـ (h) وحتى تصبح المعادله متجانسه بعديا فيجب ان يكون محصلة الوحدات على الجانب الايمن هى (W) كما فى الجانب الأيسر ولذلك فان وحدات الـ (h) يجب ان تكون W/m^2K أي وات/متر٢ درجة كلفن .

فى المعادله التاليه :-

$$V = \frac{(\rho_1 - \rho_2)}{m\rho_1\rho_2} + \frac{M_2}{\rho_2}$$

المطلوب معرفة الوحدات التى يمكن استخدامها للتعبير عن الكثافه (ρ) عندما يتم التعبير عن :- (V) بوحدات مل/مول (الحجم المولى)

(m) بوحدات مول/جرام (عدد الجزيئات فى وحدة الكتله)

(M) بوحدات جرام/مول (الوزن الجزيئى للماده)

نلاحظ ان التجانس البعدى للمعادله يحتم ان يكون محصلة الوحدات فى الطرف الايمن هو وحدات الطرف الايسر أى (مل/مول) ونلاحظ ان الطرف الايمن يتضمن جزءين مجموعين فيجب ان يكون كل جزء منهما له وحدات (مل/مول) أى ان وحدات V هى وحدات $\frac{M_2}{\rho_2}$ وبالتالى يمكن كتابتهـا فى معادله بعديه كما يلى :-

V (ml/mol) = M2 (g/mol) 1/ρ2 ( )

وبضم القيم العدديه المختلفه بالمتغيرات المختلفه فى المعادله فى جانب واحد نحصل على :-

ml/mol = g /mol x 1( ) x M2 / V ρ2

والقوس الذى لايحتوى على شىء يجب ان يحتوى على وحدات الكثافه (ρ2) وللحصول على التجانس البعدي يجب ان يعبر عنها بوحدات تؤدى إلى اختفاء الجرام (g) وظهور الملليتر (m l) فى الجانب الأيمن وبالتالى فان وحدات الكثافه الواجب استخدامها هى وحدات جم/مل (g/m l) .

اسئله وتمارين

١- حدد أى الاصطلاحات التاليه يعتبر (بعد) وأيهما يعتبر (وحده) ؟
أ- الطول   ب- كيلو جرام   ج- ساعه

٢- وحدة اللزوجه المعروفه باسم بواز poise هي عباره عن داين ث/سم٢
هل هذه الوحده تعتبر اساسيه ام وحده مشتقه ؟

٣- فى أى الوحدات يمكن التعبير عن الكميات الطبيعيه الآتيه باستخدام النظام الدولى SI ؟
أ- الوزن   (لاحظ ان الوزن وحداته وحدات القوه)
ب- الضغط   ج- درجة الحراره   د- الارتفاع
هـ- الكتله   و- الحجم   ر- كمية الحراره
ح- القدره الكهربيه   ط- القدره الميكانيكيه

٤- عبر عن الكميات الآتيه باستخدام قواعد النظام الدولى :-
أ- ١٠ ... ... ملليمتر   ب- ١ ..ر. نيوتن/م٢

٥- اوجد معاملات التحويل المناسبه فى كل من المعادلات الآتيه :-
أ- رطل/قدم٣ = (رطل/جالون) × معامل التحويل المناسب .
ب- رطل/بوصه٢ = (رطل/قدم٢) × معامل التحويل المناسب .
ج- وات = (كالورى/ث) × معامل التحويل المناسب .

٦- من المعلوم ان المعادله التاليه تستخدم لحساب كمية الحراره اللازمه لتغير درجة حرارة مادة من درجة حرارة T_1 الى درجة حرارة T_2 .

$$Q = m\, c_p\, (T_2 - T_1)$$

احسب كمية الحراره اللازمه لرفع درجة حرارة قطعة من اللحم كتلتها ١٠ رطل من درجة حرارة ٤٠°ف الى درجة حرارة ١٣٠°ف مع العلم ان الحراره النوعيه للحم (c_p) قيمها ٨ر٠ و.حـ.ب/رطل°ف معبرا عن كمية الحراره اللازمه بوحدات وات.ساعه .

٧- احسب القدره المطلوبه لسخان كهربى يستخدم لتسخين ١٠ جالون ماء من درجة حرارة ٧٠°ف الى درجة حرارة ٢١٢°ف فى مدة ١٠ دقائق وعبر عن القدره بوحدات جول/دقيقه وبوحدات (وات) مستخدما معاملات التحويل التاليه :-

الحراره النوعيه للماء = ١ و.حـ.ب/رطل°ف

٦٠ دقيقه/ساعه ، ٣٫٤١٤ و.حـ.ب/وات . ساعه ،

٨٫٣٣ رطل ماء/جالون ، ١٫٠٥٥ × ١٠^٣ جول/و.حـ.ب

٨- اذا علمت ان (طن تبريد) هو معدل سحب الحراره لتجميد ١طن (٢٠٠٠ رطل) من الماء عند درجة حرارة ٣٢°ف فى خلال مدة ٢٤ ساعه . ما هى قيمة (طن تبريد) معبرا عنها بوحدات (وات) ، وحدات (و.حـ.ب/ساعه)،الحراره الكامنه لانصهار الماء هى ٨٠ كالورى/جم.

٩- أ- فى المعادله :- $\tau = \mu\ (\ \gamma\ )$

اوجد وحدات الـ (τ) عند التعبير عن (μ) بوحدات (داين.ث/سم^٢) وعن (γ) بوحدات (ث^-١)

ب- عند التعبير عن (μ) بوحدات (رطل كتله/قدم ثانيه) ، عن (τ) بوحدات (رطل قوه/قدم^٢) ، عن (γ) بوحدات ث^-١)

ما هو التعديل المطلوب اجرائه على المعادله المذكوره حتى نحصل على التجانس البعدى ؟

١٠- المطلوب اجراء التحويلات الآتيه باستخدام القيم القياسيه للعلاقات بين وحدات الطول والعلاقه بين وحدات الكتله :-

أ- ٩٢٥ سم/ث الي ميل/ساعه

ب- ٤٨٠ سم/ث^٢ الي قدم/ساعه^٢

ج- ٦٢٫٤ رطل كتله/قدم^٣ الي جم/سم^٣

د- ١٫٠١٣ × ١٠^٦ داين/سم^٢ الى رطل قوه/بوصه^٢

هـ- ٨٧٥٠ قدم.رطل قوه الى جول والى كيلووات ساعه

و- ١٠ كيلوات الى قدم رطل قوه/ثانيه

١ ميل = ١٫٦٠٩ كم ١ قدم = ٣٠٫٤٨ سم = ١٢ بوصه

١ رطل = ٤٥٤ جرام.

١١- باستخدام المعلومات الآتيه المطلوب حساب معامل لتحويل وحدات الضغط من ملليمتر زئبق الى رطل قوه/بوصه^{٢} مع العلم ان الضغط عند قاع عمود السائل يساوى وزن هذا السائل مقسوما على مساحة مقطع العمود . استخدم هذا المعامل لايجاد قيمة الضغط الجوى القياسى بوحدات رطل قوه/بوصه^{٢} :-

كثافة الزئبق = ٦ر١٣ جم/سم^{٣}
١ بوصه = ٥٤ر٢ سم
١ رطل = ٤٥٤ جم
عجلة الجاذبيه الارضيه = ٩٨٠ سم/ث^{٢} = ١٧ر٣٢ قدم/ث^{٢}
الضغط الجوى القياسى = ٧٦٠ ملليمتر زئبق.

١٢- من المعتاد قياس كمية الطاقه الحراريه بوحدات الكالورى أ ، و.حـ.ب. احسب معامل يستخدم لتحويل الـ BTU الى قدم رطلقوه باستخدام المعلومات الآتيه فقط :-

١ كالورى = ١٨٥ر٤ جول — ١ رطل = ٤٥٤ جرام
١ و.حـ.ب = ٢٥٢ كالوري — ١ قدم = ١٢ بوصه = ٤٨ر٣٠ سم
عجلة الجاذبيه الارضيه (g) = ٩٨٠ سم/ث^{٢} = ١٧ر٣٢ قدم/ث^{٢}
المعامل (g_c) = ٩٨٠ جم.سم/جم قوه ث^{٢}
= ١٧ر٣٢ رطل كتله.قدم/رطلقوه ث^{٢}

١٣- ينساب احد الموائع له كثافه (ρ) خلال ماسورة بسرعة (V) وكان الانخفاض فى الضغط (P)
وضح ان الطاقه الكينتيكيه لكل رطل مائع له نفس البعد لناتج قسمة الانخفاض في الضغط P علي الكثافه ρ مع العلم بأن الطاقه الكينتيكيه تعرف بانها نصف حاصل ضرب الكتله فى مربع السرعه ؟
اذا علمت ان الكثافه مقدارها ٧٠ رطل/قدم^{٣} ، السرعه ٣ متر/ث ، الانخفاض في الضغط مقداره ٢٥ رطلقوه/بوصه^{٢} . احسب النسبه بين الطاقه الكينتيكيه والانخفاض فى الضغط .

الباب الثانى

الغازات المثالية

Ideal or Perfect Gases

تعريف :

الغاز المثالى يتكون نظريا من جزئيات دقيقه كروية الشكل كاملة المرونه لاتوجد بينها قوى جذب . والحجم الذى تشغله صغير جداً اذا ما قورن بالحجم الموجود بين هذه الجزئيات .

وطبقا لقوانين علم الفيزياء تبين العلاقه الآتيه ارتباط ضغط الغاز المثالى بعدد وسرعة سريان جزئيات الغاز :-

$$P = \frac{N.M.C^2}{3} \qquad (2\text{-}1)$$

حيث ان :

P = الضغط المطلق للغاز .

N = عدد جزئيات الغاز الموجوده فى وحدة حجم .

M = الوزن الجزيئى للغاز .

C = السرعه المتوسطه للجزئيات .

$$C = \sqrt{\frac{C_1^2 + C_2^2 + ... + C_N^2}{N}} \qquad (2\text{-}2)$$

ويمكن كتابة العلاقه المذكوره سابقا لضغط الغاز المثالى كما يلى :-

$$P = \frac{2}{3} N \left(\frac{MC^2}{2}\right) \qquad (2\text{-}3)$$

اى ان الضغط النوعى للغاز المثالى يساوى عدديا ثلثى الطاقه الكينيتيكيه للجزئيات المحتوى عليها فى وحدة حجم . فاذا فرض ان حجم الغاز يساوى V فيكون :

$$PV = \frac{2}{3} N.V \left(\frac{MC^2}{2}\right) \qquad (2\text{-}4)$$

$$= \frac{2}{3} n \left(\frac{MC^2}{2}\right) \qquad (2\text{-}5)$$

حيث ان :

n = NV = عدد الجزيئات الموجوده فى الحجم V

ومن النظريه الكينيتيكيه للغازات نجد أن الطاقه الكينيتيكيه تتناسب طرديا مع درجة الحراره المطلقه للغاز اى ان :

$$\frac{MC^2}{2} \alpha T \qquad (2-6)$$

حيث :

T = درجة الحراره المطلقه للغاز ($^{o}C + 273.15$) درجة حرارة كلفن

أو = ($^{o}F + 459.67$) درجة حرارة رانكن .

قوانين الغازات :

١- <u>قانون بويل</u> : Boyle's Law

يتناسب ضغط الغاز (P) مع حجمه (V) تناسبا عكسيا تحت درجة حرارة ثابته أى ان

$$PV = Constant \qquad (2-7)$$

٢- <u>قانون شارل</u> : Charl's Law

عند ثبوت الضغط ، الاحجام المتساويه من جميع الغازات المثاليه تتمدد أو تنكمش بنفس المقدار للتغير الثابت فى درجة حرارة الغازات .

أى ان

$$\frac{V}{T} = Constant \qquad (2-8)$$

٣- <u>قانون أفوجادرو</u> Avogadro's Law

عند ثبوت كلا من ضغط الغاز ودرجة حرارته ، تحتوى الاحجام المتساويه من جميع الغازات المثاليه على اعداد متساويه من الجزئيات . أى ان كثافة اى غاز تتناسب مع الوزن الجزيئى لهذا الغاز فمثلا ٣٢ جم O_2 ، ٢٨ جم N_2 ، ٢ جم H_2 ، ٤٤ جم Co_2 . . . الخ تشغل نفس الحجم عند ضغط ودرجة حرارة ثابتين.

هذا الوزن الذى يختلف باختلاف الغازات ويشغل تقريبا نفس الحجم يسمى (المول) mol وقد وجد ان حجمه يساوى ٢٢٫٤ لتراً تحت الضغط الجوى ودرجة الحرارة العاديه (760 mm Hg - 0^oC or 14.7 lbf/in^2 - 32^oF)

٤- <u>قانون جول</u> Joule's Law

الطاقه الداخليه لغاز مثالى تعتمد على درجة حرارته فقط ولاتعتمد على حجمه او الضغط الواقع عليه .

$$\Delta U = m.c_v.\Delta t \qquad (2\text{-}9)$$

٥- <u>القانون العام للغازات المثاليه</u> Universal Ideal Gas Law

وهو نتيجة لقانونى بويل وشارل :

$$PV = n\,R_oT \quad = \quad or \quad Pv = R_oT \qquad (2\text{-}10)$$

وحيث يسمى الثابت " R_o" بالثابت العام للغازات وقيمته بالوحدات المختلفه كما يأتى:

R_o =	1545	lbf. ft/lb mol.R
=	848	Kp.m/k mol.K
=	8314.4	N.m/k mol. K
=	8.3144	KJ/k mol. K
=	1.986	BTU/lb mol.R
=	l.986	Cal/gm mol. K
=	1.986	K Cal/k mol. K

وتكون V فى هذه الحاله هى الحجم المولى للغاز.

والقانون العام ينطبق على الغازات المثاليه فقط . لذلك فان جميع الغازات التى تكون عند درجة حرارة بعيده لايمكن تطبيقه عليها وكذلك على الابخره المختلفه (بخار الماء مثلا) لان جزئياتها تكون ملاصقه لبعضها ولايمكن اهمال طاقة الشغل الكامنه لضغط الجزئيات الى بعضها أو فصلها عن بعضها .

٦- <u>قانون دالتون للضغوط الجزئيه</u> Dalton's Law

ضغط مخلوط من الغازات او الابخره يساوى مجموع الضغوط الفرديه لكل غاز او بخار كما لو كانت موجوده بمفردها تحت نفس درجة الحراره وفى نفس الحجم الذى يشغله المخلوط أى ان :

$$P = P_1 + P_2 + P_3 + ... \qquad (2\text{-}11)$$

ووزن المخلوط يكون مجموع اوزان الغازات المكونه له :

$$m = m_1 + m_2 + m_3 + ... \qquad (2\text{-}12)$$

وباستخدام القانون العام للغازات باعتبار V هى الحجم الكلى لجزئيات الغاز :

$$V = \frac{m}{M} . R_o . \frac{T}{P} \qquad (2\text{-}13)$$

حيث ان :

m = الوزن الكلى للغاز (كتلة الغاز) .

M = الوزن الجزيئى للغاز.

$\frac{m}{M}$ = عدد الجزيئات فى الغاز = n.

ولمخلوط من الغازات او الابخره موجوده فى حجم "V"

$$\therefore \frac{m.R_o.T}{M.P} = \frac{m_1.R_o.T}{M_1.P_1} = \frac{m_2.R_o.T}{M_2.P_2} = ... \qquad (2\text{-}14)$$

$$\therefore \frac{m}{M.P} = \frac{m_1}{M_1.P_1} = \frac{m_2}{M_2.P_2} = ... \qquad (2\text{-}15)$$

٧- <u>قانون اماجات للحجوم الجزيئيه</u> Amagat's Law

حجم مخلوط من الغازات او الابخره يساوى مجموع الاحجام الفرديه لكل غاز او بخار كما لو كانت موجودة بمفردها تحت نفس درجة الحراره وتحت الضغط الواقع على المخلوط .

أى ان :

$$V = V_1 + V_2 + V_3 + ... \qquad (2\text{-}16)$$

مثال :

خزان من الصلب حجمه ٢ متر مكعب يحتوى على هواء جاف عند ضغط مانومترى ٢٫٧٥ بار ودرجة حرارة ٢٠°م. احسب وزن الهواء الموجود داخل الخزان . ماهو الوزن اللازم اضافته من النتروجين الجاف الى هواء الخزان لكى يرتفع ضغط المخلوط إلى ٤٫١٥ بار عند نفس درجة الحراره .

الحل :

Atmospheric Pressure = 1.013 bar

Absolute Pressure of Air = 2.75 + 1.013 = 3.763 bar

Absolute Pressure of mixture = 4.15 + 1.013 = 5.163 bar

Manometric Pressure of nitrogen = 5.163 - 3.763 = 1.4 bar

ويمكن حساب وزن الهواء باستخدام القانون العام للغازات .

$$\text{Mass of Air} \quad (m) = \frac{P.V.M}{R_o.T}$$

$$= \frac{3.763 \times 10^5 \times 2 \times 28.97}{8314.4 \times (20 + 273.15)} = 8.95 \quad kg$$

ويمكن حساب وزن النتروجين من نتيجة قانون دالتون :

$$\frac{m_1}{M_1.P_1} = \frac{m_2}{M_2.P_2}$$

أى ان :

$$\frac{8.95}{28.97 \times 3.763 \times 10^5} = \frac{m_2}{28.02 \times (1.4 + 1.013) \times 10^5}$$

$\therefore$ Mass of Nitrogen $(m_2) = 5.55$ kg.

الباب الثالث

مبادئ الديناميكا الحرارية

Principles of Thermodynamics

مقدمه :

تعتمد جميع الكائنات الحيه فى بقائها حيه على الطاقه وتوجد الطاقه فى صور عديده ابتداء من الطاقه الموجوده فى ذرات الماده نفسها وحتى الطاقه التى تشعها الشمس وفيما بينهم نجد لدينا مصادر عديده على سبيل المثال الطاقه الكيماويه للوقود وطاقة الوضع للكميات الكبيره للماء المتبخر بواسطة أشعة الشمس والمهم ان توجد الوسيله التى تؤدى إلى الانتفاع بالطاقه من مصدرها لخدمة البشريه فمثلا يتم تحويل طاقة الوضع للكميات الضخمه من الماء الى طاقة كهربيه بوضع توربينات مائيه فى طريق انحدارها من الجبال إلى البحار مثلا . كذلك يمكن استخدام طاقة احتراق الفحم لانتاج البخار الذى يستخدم بدوره لتوليد الطاقه الكهربيه بواسطة التوربينات البخاريه كما يستخدم طاقة احتراق الوقود البترول فى آلات الاحتراق الداخلى لتسخين الهواء حتى يتمدد ويدفع المكبس لينتج طاقة ميكانيكيه .

[ونجد أن علم الديناميكا الحراريه هو العلم الذى يقوم بدراسة العلاقه بين الحراره والشغل وخواص النظم . كما يهتم بالوسائل اللازمه لتحويل الطاقه الحراريه من مصادرها المتاحه إلى الشغل الميكانيكى]. ويطلق اسم الآله الحراريه Heat Engine علي النظام الذى يعمل فى دورة لينتج شغل من مصدر حراري .

ويجب ان نقوم بتعريف للمفاهيم المستخدمه عند دراسة الديناميكا الحراريه كما يلى:-

١- **الحراره** Heat

هى احدى صور الطاقه ويمكن ان تنتقل من جسم الى آخر ذو درجة حراره أقل.

٢- **النظام** System

يعرف النظام بأنه مجموعه من الماده له حدود معرفه وهى ليست من الضرورى أن تكون حدودا غير مرنه ويمكن ان يكون النظام :-

- **نظام مغلق** Closed System :- على سبيل المثال المائع فى اسطوانة آلة ترددية خلال شوط التمدد يمكن ان يعرف علي انه نظام وحدوده جدران الاسطوانه وهو نظام مغلق حيث لايوجد انتقال للكتله عبر الحدود المعروفه.

- **نظام مفتوح Open system**:- على سبيل المثال المائع فى توربين يمكن ان يعرف على انه نظام حدوده تتضمن التوربين وبداية ماسورة الدخول والخروج الا أن انتقال المائع خلال التوربين اى انتقال كتلة يجعله نظاما مفتوحا. والنظام له ضغط يمكن تعريفه بأنه القوه الواقعه علي وحدة المساحات من الحدود المحيطه بالنظام .

كما أن للنظام حجم نوعى وهو الحجم الذى يشغله وحدة الكتله من النظام .

٣- **الشغل Work**:

يعرف الشغل بانه حاصل ضرب القوه × المسافه التى تتحركها فى اتجاه القوه وعندما تتحرك حدود نظام مغلق للخارج فى اتجاه القوه المسلطه عليها يقال أن النظام بذل شغلا على ما يحيط به أما اذا تحركت حدود النظام للداخل فيقال أنه بذل شغل على النظام .

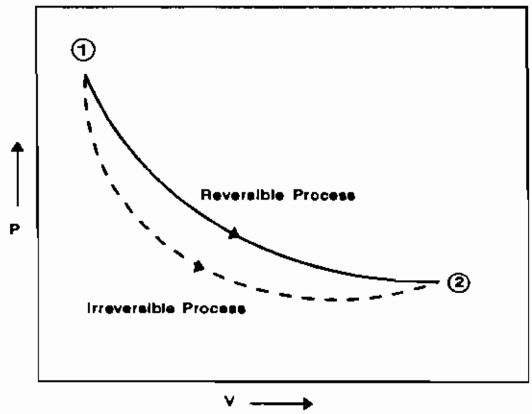
وكل من الشغل والحراره طاقة يمكن ان تنتقل ويجب الايحدث خطأ بين مفهومها وبين مفهوم الطاقه الداخليه لنظام . فعلي سبيل المثال اذا وجد أسطوانه تحتوى علي غاز تحت ضاغط ومعزوله عزلا جيدا وتم تحريك الضاغط للداخل فان درجة حرارة وضغط الغاز سترتفع ولما كان الاسطوانه معزوله جيدا فهذا يعني عدم تسرب كمية من الحراره منها او اليها وتكون نتيجة الشغل الذي يبذل علي الغاز هو ازدياد الطاقه الداخليه للنظام. ومن جهه اخرى نفترض أنه لدينا وعاء صلب يحتوى على غاز وتم تسخينه فان حدود النظام صلبه ولاتتحرك وبالتالى لايستطيع الغاز أن يتمدد ويبذل شغلا نتيجة الحراره المضافه اليه ولكن نجد ان درجة الحراره ترتفع وتزداد الطاقه الداخليه للنظام وبالتالى يتضح أن الطاقه الداخليه يمكن ان تزداد بقيمة اضافة شغل او اضافة حرارة .

٤- **مائع الشغل The Working Fluid**:

من الوجهه العلميه نجد أن الماده الموجوده داخل حدود أى نظام قد تكون سائل او بخار أو غاز ويطلق عليها اسم مائع الشغل The Working Fluidوفى لحظة ما يمكن تعريف حالة المائع بمعرفة خواصه الثرموديناميكيه والتى تتضمن :-

درجة الحراره (T) ، الحجم النوعى (v) ، الطاقه الداخليه النوعيه (u) والانثالبى النوعى (h) ، الانتروبى النوعي (s) ولقد وجد انه لموانع الشغل النقيه مجرد معرفة خاصيتين له يمكن معرفة حالة المائع تماما (State) ويمكن تحديده على خريطة توضح العلاقه بين تلك الخاصيتين بنقطه مثل خرائط p.v التى توضح العلاقه بين الضغط والحجم النوعى .

٥- الانعكاسيه Reversibility:



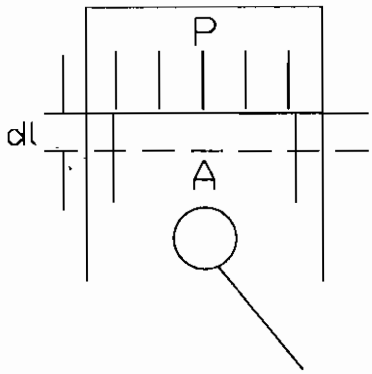
شكل (٢-١) الاجراءات الانعكاسيه والغير إنعكاسيه

لقد تم ايضاح انه بمعرفة خاصيتين لمائع الشغل يمكن تحديد حالته بنقطة علي الخريطه التي تمثل العلاقه بين هاتين الخاصيتين واذا حدث تغيير لحالة المائع فيمكن تحديد حالته الجديده بنقطة جديده واذا كانت النقطه الاولى هى رقم 1 فيمكن تسمية النقطه الثانيه برقم 2 . وعندما يكون من الممكن تحديد جميع النقط الواقعه بين النقطتين 2 ، 1 فان هذا التعبير من الحاله (1) الى الحاله (2) اجراء Process كما هو مبين بالشكل (٢-١) وبالتالى يكون الاجرآء انعكاسى وعادة يتم تمثيله على الخريطه بخط متصل. وعلميا عندما يحدث اجراء على مائع ولايمكن تحديد النقط الوسيطه بين حالته الابتدائيه والنهائيه فنقول ان الاجراء غير انعكاسى Irreversible ويرسم الخط بين الحالتين مقطع وليس متصلا .

ويمكن تعريف الانعكاسيه كما يلى :-

عندما يتم اجراء انعكاسى فانه يمكن اعادة المائع ومايحيط به الى حالتهم الاصليه. ويتضمن الاجراء الانعكاسى عدم وجود احتكاك .

٦- الشغل الانعكاسى Reversible Work



شكل (٣-٢) حركة الكباس داخل الاسطوانه

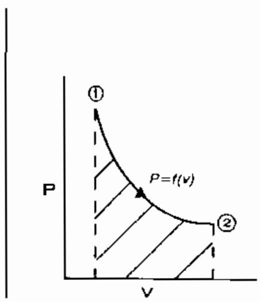
الاسطوانه المقابله تحتوى على مائع مثالى ولايوجد احتكاك فى النظام وضغط ودرجة حرارة المائع منتظمه فى اجزائه . افترض ان مساحة مقطع الكباس "A" وضغط المائع "p". افترض ان القوه المحيطه على الكباس هى "p A". افترض ان الكباس تحرك تحت قوة المائع للخارج مسافة صغيره "dL". كما هو مبين فى شكل (٣-٢) وبالتالى فان الشغل المبذول بواسطة المائع على الكباس هو حاصل ضرب قوة المائع فى المسأحه التي تحركها الكباس أى أن :

$$\text{Work done} = (pA) \times dL = pdV \qquad (3\text{-}1)$$

حيث ان "dV" ازدياد صغير فى حجم المائع وعندما تكون كمية المائع وحدة كتلة فان "V" تصبح الحجم النوعى v , dV تصبح dv. وبالتالى فان عند حدوث انعكاس من الحاله 1 الى الحاله 2 ، يمكن حساب الشغل من المعادله:

$$\text{Work} = \int pdv \qquad (3\text{-}2)$$

وبالتالى عندما يتم تمثيل التغير من الحاله ١الى الحاله ٢، لاجراء انعكاسى على خريطة(p-v) كما فى الشكل (٣-٣) فان المساحه المظلله تمثل الشغل المبذول بواسطة المائع.

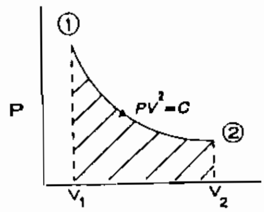


شكل (٣-٣) تمدد الغاز داخل الاسطوانه

مثال رقم ١ :-

مـائع عند ضـغط ٣ بار وذو حـجم نوعى ١٨ر٠م^3/كـجم مـوجـود فى اسطوانه وراء كباس وتمدد انعكاسيا الى ضغط مقداره ٦ر٠"بار" تبعا للمعادله ($p = c/v^2$) حيث c (ثابت) .احسب الشغل المبذول بواسطة المائع علي الكباس ؟

الحـــــل



الشكل السابق يوضح الاجراء المذكور والمساحه المظلله تمثل الشغل المبذول. ولما كانت العلاقه بين الضغط والحجم معلومه فيمكن حســـاب الشغل كما يلى :-

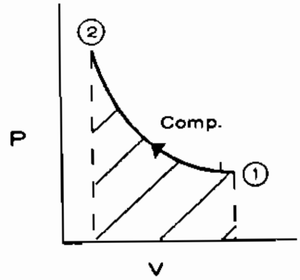
$$w = \int_{v_1}^{v_2} pdv = \int_{v_1}^{v_2} c/v^2 \ dv = c\,[-1/v]_{v_1}^{v_2}$$

$$c = p_1 v_1^2 = (3)\ (10^5)\ (0.18)^2 = 9720 \text{ Pa } (m^3/kg)^2$$

$$v_2 = (c/p_2)^{0.5} = \quad 0.402\ m^3/kg$$

$$\therefore W = 9720\ [(1/0.18 - 1/0.402)] = 29840 \text{ joule/kg}$$

$$= 29.840 \text{ kj/kg}$$



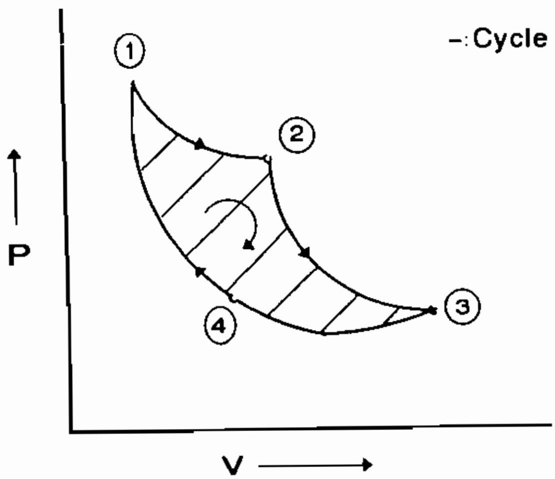
شكل (٣-٤) انضغاط الغاز داخل الاسطوانه

عندما يتم اجراء بحيث يتم ضغط المائع انعكاسيا من الحاله (1) الى الحالـــــه (2) فان الشغل هنا يكون قد بذل على المائع وعند تمثيل الاجراء على خريطـــة (p-v) كمــا في الشكل (٢-٤) فــان الشــغل المبــذول على المائع تمثله المساحـــــــه المظلله وعند معرفة العلاقه بين الضغط والحجم يمكن حساب هذا الشغل وسنجد ان قيمته ذات اشاره سالبه حيث تعنــى تلك الاشاره ان الشغل مبذول علي المائع.

$$\text{Work done} = \int p\,dv$$

وكقاعده عندما يتم توضيح الاجراء على خريطة p-v فاذا كان اتجاه خط الاجراء من اليسار إلى اليمين فان الشغل موجب مبذول بواسطة المائع واذا كان اتجاه خط الاجراء من اليمين الى اليسار فان الشغل سالب مبذول علي المائع .

٧- الدوره Cycle:-

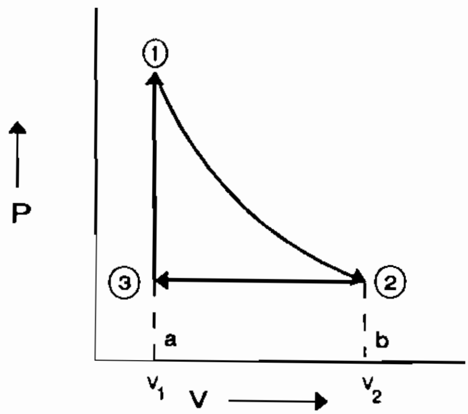


شكل (٢-٥) تمثيل الدورة على خرائط الـ P-V

عندما يتم عمل عدة اجراءات متتاليه على مائع وفى الاجراء النهائي يعود المائع الى حالتـه الاصليـه فـانه يكون قـد تم اجـراء "دورة" وعندمـا تكون اجراءات الدوره انعكاسيـة فان الدوره ايضا تكون انعكاسيـه. ويمكن تمثيل الدوره ايضا علي خريطة (p-v) وتأخذ شكلا مغلقا حيث المساحه داخله تمثل الشـغل المبـذول بواسطة المائع أو عليـه وعندمـا يتم اجـراء الدوره ويتم وصف اجرائها فى ترتيب مماثل لاتجاه دوران عقارب الساعه فان الشغـــل الصافي للدوره يكون مبذولا بواسطة المائع اي موجب القيمه والعكـــس صحيح (شكل ٢ - ٥).

مثال رقم ٢ :

اسطوانه تحتوى على ١ كجم من مائع عند ضغط ابتدائى قدره ٢٠ "بار". سمح للمائع بالتمدد انعكاسيا وراء ضاغط تبعا للمعادله ($pv^2 = c$) حتي تضاعف الحجم بعد ذلك تم تبريد المائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت حتي وصل الضاغط الى موضعه الاصلي ، تم اضافة كمية من الحراره للمائع مع تثبيت الضاغط فى مكانه فازداد الضغط حتى القيمه الأصليه ٢٠ "بار" . احسب الشغل الصافى المبذول بواسطة المائع اذا علمت ان الحجم الابتدائى هو ٠٫٠٥م٣ .



الحل

الشكل السابق يوضح الدوره المذكوره

$$p_1 v_1^2 = p_2 v_2^2$$

$$\therefore\ p_2 = p_1 \ (v_1 / v_2)^2$$

$$= \ (20)\ (1/2)^2 = 5 \text{ bar}$$

الشغل المبذول من الحاله (1) الى الحاله (2) W_{1-2} تمثله المساحه a b 2 1

$$W_{1-2} = \int \frac{C}{V^2}\ dv \qquad c = p_1 v_1^2 = (20)\ (10^5)\ (0.05)^2$$

$$\therefore\ W_{1-2} = 20 \times 10^5 \times (0.05)^2 \ [1/0.05 - 1/0.1\ ] \ = 50000 \ \text{ N.m}$$

الشغل المبذول من الحاله (2) الى الحاله (3) W_{2-3} تمثله المساحه 3a b 2

$$\therefore W_{2-3} = \int Pdv \quad P = Constant = P_2 = P_3 = 5 \text{ bar}$$

$$W_{2-3} = p_2 (V_3 - V_2) = (5)(10^5)[0.05 - 0.1] = 25000 \text{ N.m}$$

الشغل المبذول من الحاله (3) الى الحاله (1) قيمته صفر حيث لم يتحرك الضاغط

$$W_{3-1} = \int pdv$$

$$dv = 0 \quad \therefore W_{3-1} = 0$$

صافى الشغل تمثله المساحه 3 , 2 , 1

$$W = 50000 - 25000 + 0 = 25000$$

القانون الاول للديناميكا الحراريه

اوضح العلماء فى اوائل القرن التاسع عشر مفهوم الطاقه وأنها لاتخلق من عدم ولاتفنى وهى الاساس المعروف ببقاء الطاقه . والقانون الاول للديناميكا الحراريه ماهو الا الصيغ لهذا المفهوم العام مع توضيح العلاقه بين الطاقه الحراريه والطاقه الميكانيكيه ولذلك نجد ان هذا القانون يصاغ كمايلي :-

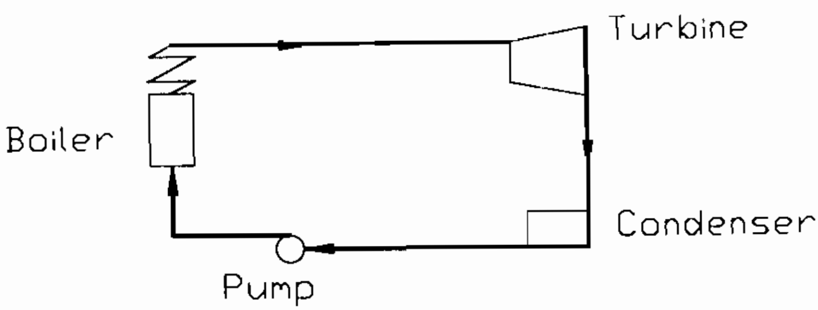
(عندما يخضع نظام لدورة ديناميكيه حراريه فان صافى الطاقه الحراريه المضافه للنظام من الجو المحيط به يساوى صافى الشغل المبذول بالنظام على الجو المحيط به) وبالتالى يمكن التعبير عنه رياضيا كما يلى :-

$$\Sigma\, dQ = \Sigma\, dW$$

حيث علامة Σ تعبر عن المجموع فى دورة كامله

مثال رقم ٣ :-

ينتج توربين بخارى ١٠٠٠ كيلووات . كمية الحراره المضافه للبخار فى الغلاية ٢٨٠٠ كيلوجول/كجم. كمية الحراره المطروده الى مياه التبريد فى المكثف هى ٢١٠٠ كيلوجول/كجم. والشغل اللازم لمضخة اعادة المياه المتكثفه الى الغلايه ٥ كيلووات احسب معدل انسياب البخار فى تلك الدوره بوحدات كجم/ث. والشكل التالى يوضح الدوره المذكوره.



$$\Sigma dQ = 2800 - 2100 = 700 \text{ k J/kg}$$

نفترض ان معدل سريان البخار هو m كجم/ثانيه

$$\therefore \quad \Sigma dQ = 700\ m\ kJ/s$$

$$\Sigma dW = 1000 - 5 = 995kW = 995kJ/s$$

وبتطبيق القانون الاول ينتج ان :-

$$\Sigma dQ = \Sigma dW$$

$$700\ m = 995$$

$$m = 1.421\ kg/s$$

اى ان معدل انسياب البخار ١٫٤٢١ كجم/ث.

معادلة عدم السريان The non flow equation

عندما نقوم باجراء على نظام حيث يتغير من الحاله ١ الى الحاله ٢ وتزداد طاقته الداخليه (U) فانه يتم التعبير عن القانون الأول للديناميكا الحراريه بان الزياده فى الطاقه الداخليه للنظام هى الفرق بين صافى كمية الحراره المضافه للنظام وصافى الشغل الناتج أى ان :-

$$U_2 - U_1 = dQ - dw \tag{3-3}$$

ويمكن الوصول الى المعادله التاليه والتى تعرف بمعادلة عدم السريان :-

$$dQ = dU + dW \tag{3-4}$$

مثال رقم ٤ :-

فى شوط الانضغاط لآلة احتراق داخلى وجد ان كمية الحراره المطروده لماء التبريد هى ٤٥ كيلوجول/كجم والشغل المبذول مقداره ٩٠ كيلوجول/كجم. احسب التغير فى الطاقه الداخليه النوعيه لمائع الشغل وحدد ما اذا كان التغير فقد أو اكتساب ؟

الحل

$Q = -45\ kJ/kg$ الاشاره سالبه لانها حراره مطروده

$W = -\ 90\ kJ/kg$ الاشاره سالبه لأنه شغل مبذول على النظام

باستخدام المعادله التاليه :

$$dQ = du + dw$$

$$Q = (u2 - u1) + W$$

$$-45 = (u_2 - u_1) - 90$$

ازدياد فى الطاقه الداخليه

$$u_2 - u_1 = -45 + 90 = 45 \text{ kJ/kg}$$

معادلة السريان المستقر The steady flow equation

سبق ان ذكرنا ان المائع له طاقه داخليه ترجع لخواصه الثرموديناميكيه إلا ان المائع اذا تحرك بسرعه "C" وكان على ارتفاع من سطح الارض أوخط مرجع "Z" فان ١ كجم مائع يحتوى بالاضافه الى طاقته النرعيه الداخليه (u) على طاقة حركيه ($C^2/2$) وطاقة وضع Zg ، كما يحتوى على طاقة الضغط pv فاذا فرض ان المائع يتحرك بين نقطتين (١) ، (٢) ونفترض أنه يضاف إليه حرارة عند النقطه (١) وينتج شغل عند النقطه (٢) فان مجموغ الطاقه فى النظام لكل ١ كجم عند اية نقطه ثابت ، وعندما ينساب المائع بمعدل انسياب كتله ثابته فانه يقال ان الانسياب مستقر وعندئذ يمكن الحصول على المعادله التاليه :-

$$u_1 + (C_1^2/2) + Z_1g + p_1v_1 + Q_1 = u_2 + (C_2^2/2) + Z_2g + p_2v_2 + Q_2 \quad (3\text{-}5)$$

وفى مسائل وتمارين الديناميكا الحراريه يمكن اهمال التغير فى طاقه الوضع وبالتالى يمكن رفع القيمه Zg من المعادلة السابقه كما أن مجموع الطاقه الداخليه **u** + طاقة الضغط pv تعرف بالانثالبى h وبالتالى يمكن الحصول **على** المعادله التاليه والتى تستخدم فى حالة السريان المستقر فى حسابات الديناميكا الحراريه

$$h_1 + C_1^2/2 + Q = h_2 + C_2^2/2 + W \qquad (3\text{-}6)$$

وتسمى معادلة سريان الطاقه المستقر Bernoulli's Equation

مع ملاحظة ان الانثالبى هو

$$h = u + pv \qquad (3\text{-}7)$$

وان معدل سريان الكتله هو

$$m = CA/v = \rho CA \qquad (3\text{-}8)$$

مثال رقم ٥ :-

فى اسطوانة محرك هواء وجد ان الهواء المضغوط له طاقه داخليه نوعيه مقدارها ٤٢٠ كيلوجول/كيلوجرام عند بداية التمدد ، ٢٠٠ كيلوجول/كيلوجرام بعد نهاية التمدد .

احسب كمية الحراره المنسابه من أو الى الاسطوانه اذا علمت ان الشغل المبذول بواسطة الهواء خلال التمدد هو ١٠٠ كيلوجول/كجم.

الحل

باستخدام المعادله التاليه :

$$Q = (u_2 - u_1) + W \qquad (3-9)$$

$$\therefore \quad Q = (200 - 420) + 100$$
$$= -120 \text{ kJ/kg}$$

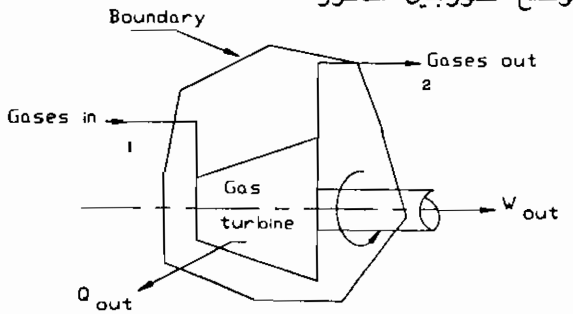
∴ تم طرد كمية حرارة من الهواء مقدارها ١٢٠ كيلوجول/كجم (حيث الاشاره سالبه) .

مثال رقم ٦ :

تنساب الغازات خلال توربين غازى بمعدل ١٧ كجم/ث وتنطلق قدرة من التوربين مقدارها ١٤٠٠٠ كيلووات. قيمة الانثالبى للغازات عند دخولها وخروجها من التوربين هى ١٢٠٠ ك جول/كجم ، ٣٦٠ ك جول/كجم علي التوالى . وسرعة دخول الغازات وخروجها هى ٦٠م/ث ، ١٥٠م/ث على التوالى . احسب معدل طرد الحراره من التوربين .

أوجد ايضا مساحة ماسورة الدخول اذا علمت ان الحجم النوعى للغازات عند الدخول هى ٥ر. م٣/كجم.

الشكل الآتي يوضح التوربين المذكور:-



الحلـــ

نستخدم معادلة سريان الطاقه المستقر التاليه :-

$$h_1 + C_1^2/2 + Q = h_2 + C_2^2/2 + W \qquad (3\text{-}10)$$

يمكن حساب الطاقه الكينتيكيه عند الدخول

$$C_1^2/2 = (60)^2/2 \quad (m/s)2\ (kg/kg)$$
$$= 180\ J/kg = 1,8\ kJ/kg$$

وبالتالي نجد ان الطاقه الكينتيكيه عند الخروج $C_2^2/2 = 11.25\ kJ/kg.$

ويمكن حساب الشغل بقسمة الطاقه علي معدل انسياب الكتله

$$W = 14000 \div 17 = 823.5\ kJ/kg$$

والآن بالتعويض فى المعادله (٣-١٠) نجد ان:-

$$1200 + 1.8 + Q = 360 + 11.25 + 823.5$$
$$Q = -7.02 \quad kJ/kg$$

الاشاره السالبه تعني ان الحراره مطروده ويمكن بضربها فى (m) الحصول على معدل طرد الحراره أى أن

$$Q = 7.02 \times 17 = 119.3\ kwatt.$$

وللحصول على مساحة ماسورة الدخول تستخدم المعادله التاليه :

$$m = CA/v$$

اى ان مساحة مقطع ماسورة الدخول هى

$$A = (v)\ (m)/C$$

$$A = (17 \times 0.5) \div 60 = 0.142\ m^2$$

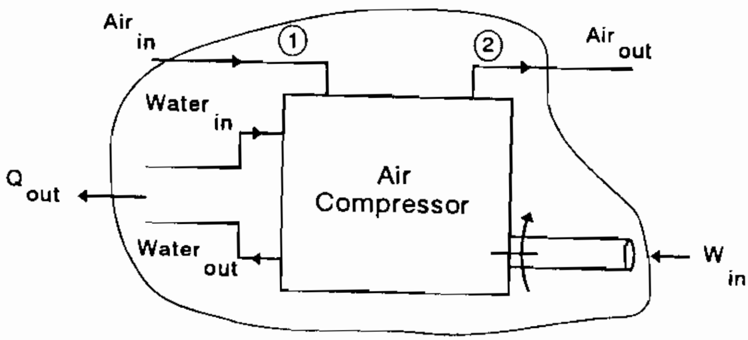
مثال رقم ٧ :

ينساب هواء انسيابا مستقرا بمعدل ٤ر. كجم/ث خلال ضاغط هواء ويدخل بسرعه ٦م/ث وضغط ١ بار وحجم نوعى ٨٥ر. م^3/كجم ويترك الضاغط بسرعة ٥ر٤ م/ث وضغط (٩ر٦) بار وحجم نوعى ١٦ر.م^3/كجم. والطاقه الداخليه النوعيه

للهواء عند تركه الضاغط تزيد ٨٨ ك جول/كجم عن قيمتها عند دخول الضاغط . يحيط اسطوانة الضاغط غلاف به ماء التبريد يمتص الحراره من الهواء بمعدل ٥٩ كيلوجول/ثانيه . احسب القدره اللازمه لإدارة الضاغط ومساحة مقطع ماسورة الدخول والخروج .

الحل

يلاحظ أنه يمكن كتابة معادلة السريان بدون احتواء للرمز Z والرسم التخطيطى التالى يوضح الاجراء :-



Boundary

من معادلة السريان المستقر

$$u_1 + p_1v_1 + C_1^2/2 + Q = u_2 + p_2v_2 + C_2^2/2 + W$$

$$W = (u_1 - u_2) + (p_1v_1 - p_2v_2) + \left[\frac{(C_1^2 - C_2^2)}{2}\right] + Q$$

$$W = -[88 \times 1000] + [(1)\ (10^5)\ (0.85) - (6.9)\ (10^5) \times (0.16)]$$

$$+\left[\frac{(6^2 - 4.5^2)}{2}\right] - [(59/0.4)\ 1000] = -\ 260892.13 \quad J/kg$$

$$= -260.9 \quad kJ/kg$$

لاحظ ان كمية الحراره مفقوده ولذا عوض عنها باشارة سالبه وتم قسمتها على معدل سريان الكتله لتصبح كمية حرارة/كجم واشارة الشغل سالبه لانه بذل علي المائع .

القدرة اللازمه لادارة الضاغط :

$$Power = 260.9 \times 0.4 = 104.4 \quad kJ/s \quad = 104.4 \quad kW$$

مساحة مقطع ماسورة الدخول (A_1):

$$m = C_1 A_1 / v_1$$

$$A_1 = \frac{m.v_1}{C_1} = \frac{0.4 \times 0.85}{6} = 0.057 \ m^2$$

مساحة مقطع ماسورة الخروج (A_2) :

$$m = C_2 A_2 / v_2$$

$$A_2 = \frac{m.v_2}{C_2} = \frac{0.4 \times 0.16}{4.5} = 0.014 \ m^2$$

الغاز التام The perfect gas

الغاز التام هو غاز مثالى ينطبق عليه القانون العام للغازات تماما حيث عمليا لايوجد غاز يتبع هذا القانون تماما ولكن الكثير من الغازات تقترب من هذا القانون والقانون العام للغازات يكتب بالصيغه التاليه :

$$PV = mRT \qquad (3.11)$$

حيث P ضغط الغاز ، V حجم الغاز ، m كتلة الغاز ، T درجة حرارة الغاز المطلقه ، R فيعرف بالثابت النوعى للغاز . ويلاحظ ان تلك المعادله تجمع خواص الغاز المختلفه عند حالة state معينه .

والثابت النوعي للغاز R وحداته كيلوجول/كجم كلفن وهو يساوى حاصل قسمة الثابت العام للغازات على الوزن الجزئي للغاز (الكتله المولية) والثابت العام للغازات يرمز له بالرمز R_o وهو قيمة ثابته لجميع الغازات الا انه يتوقف علي الوحدات المعبره عنه ونجد ان قيمته في وحدات S.I هي :-

$$R_o = 8.3144 \quad kJ/kg\ mol.K$$

مثال رقم ٨ :

وعاء ذو حجم ٢ر. م^٣ يحتوى غاز النيتروجين عند ضغط ١٣ .١ر١ بار ودرجة حرارة ١٥°م. تم اضافة ٢ر. كجم غاز نيتروجين للوعاء . احسب الضغط الجديد فى الوعاء عندما تعود درجة حرارة الوعاء الى الدرجة الاصليه . الكتله المولية لغاز النيتروجين هى ٢٨ كجم/كيلومول.

الحل

يمكن حساب R للنتروجين حيث :-

$$R = R_o/M = 8.3144/28 = 0.2969 \quad kJ/kg\ K$$

من المعادله العامه للغازات يمكن معرفة كتلة النيتروجين حيث :

$$P_1V_1 = m_1RT_1$$

$$(1.013 \times 10^5)\ (0.2) = m_1\ (0.2969)\ (1000)\ (15 + 273)$$

$$\therefore \quad m_1 = 0.237\ kg$$

بعد اضافة النيتروجين تصبح الكتله النهائيه m_2

$$\therefore \quad m_2 = 0.237 + 0.2 = 0.437\ kg.$$

بتطبيق المعادله العامه للغازات يمكن حساب الضغط النهائى للنيتروجين كما يلى :-

$$P_2V_2 = m_2\ R\ T_2$$

$$(P_2 \times 10^5)\ (0.2) = (0.437)\ (0.2969)\ (1000)\ (15 + 273)$$

$$P_2 = 1.868 \quad bar$$

الحراره النوعيه للغازات Specific heat of gases

يوجد لكل غاز قيمتان للحراره النوعيه احدهما تعرف بالحراره النوعيه تحت ضغط ثابت c_p والاخري تعرف بالحراره النوعيه تحت حجم ثابت c_v.

وبالتالى عند تسخين غاز ما من درجة حرارة T_1 الى درجة حرارة T_2 فان كمية الحراره التي تنساب اليه فى اجراء انعكاسى تحت ضغط ثابت هى :-

$$Q = m c_p (T_2 - T_1) \qquad (3-12)$$

وفى حالة اجراء انعكاسى تحت حجم ثابت هى :-

$$Q = m c_v (T_2 - T_1) \qquad (3-13)$$

قانون جول Joul's Law:-

يقرر قانون جول ان الطاقه الداخليه لغاز (U) دالة لدرجة الحراره المطلقه للغاز ولتقدير تلك الداله نعتبر انه تم تسخين ١كجم غاز تحت حجم ثابت وبالتالى يمكن تطبيق معادلة عدم السريان والتعويض عن dW بالقيمه صفر نظرا لثبات الحجم أى أن

$$(dW = Zero)$$

$$dQ = dU + dW$$

$$dQ = dU$$

وسبق ان اوضحنا انه عند تسخين الغاز تحت حجم ثابت فان

$$Q = m c_v (T_2 - T_1)$$

لذلك فان :-

$$dQ = dU = m c_v dt \qquad (3-14)$$

وباجراء التكامل فانه

$$U = m c_v T + K \qquad (3-15)$$

حيث K ثابت التكامل ولكن من قانون جول الطاقه الداخليه دالة للحراره المطلقه أى ان العلاقه بينهما خطيه وعندما تمر بنقطة أصل (صفر ، صفر) فان K تصبح قيمتها صفر ولقد اعتبر ان قيمة U صفر عند درجة حرارة الصفر المطلق ولذا فالمعادله الأخيره (3-15) تصبح :-

$$U = m c_v T \qquad (3-16)$$

وبالتالى فالتغير فى الطاقه الداخليه تحسب كما يلى :-

$$U_2 - U_1 = m\, c_v\, (T_2 - T_1) \qquad (3\text{-}17)$$

العلاقه بين قيمتى الحراره النوعيه لغاز :-

عند تسخين ١ كجم غاز من درجة حرارة T_1 الى درجة حرارة T_2 تحت ضغط ثابت فان كمية الحراره المنسابه الى الغاز هى :-

$$Q = m\, c_p\, (T_2 - T_1) \qquad (3\text{-}18)$$

وبتطبيق معادلة عدم السريان نجد أن :-

$$Q = (U_2 - U_1) + W \qquad (3\text{-}19)$$

وسبق ان اوضحنا ان :-

$$(U_2 - U_1) = m\, c_v\, (T_2 - T_1) \qquad (3\text{-}20)$$

ويمكن حساب الشغل عند ضغط ثابت كما يلى :-

$$W = p\, (V_2 - V_1) \qquad (3\text{-}21)$$

$$= mR\, (T_2 - T_1) \qquad (3\text{-}22)$$

مما سبق نجد ان :

$$m\, c_p\, (T_2 - T_1) = m\, c_v\, (T_2 - T_1) + mR\, (T_2 - T_1) \qquad (3\text{-}23)$$

وبالتالى فان :

$$c_p = c_v + R \qquad (3\text{-}24)$$

or

$$R = c_p - c_v \qquad (3\text{-}25)$$

الانثالبى للغاز التام :-

سبق أن عرفنا ان الانثالبي هو مجموع الطاقه الداخليه وطاقة الضغط أى ان:-

$$H = U + PV \qquad (3\text{-}26)$$

$$= m\, c_v T + mRT$$

$$= mT\, (c_v + R)$$

ولكن :

$$c_p = c_v + R$$

لذلك فان :

$$H = m\, c_p T \qquad (3\text{-}27)$$

النسبه بين الحرارتين النوعيتين لغاز :-

يطلق على النسبه بين الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت والحراره النوعيه تحت حجم ثابت الرمز جاما " γ " أى أن

$$\gamma = c_p / c_v \qquad (3\text{-}28)$$

ويمكن الوصول الى المعادلات التاليه :

$$c_v = R/(\gamma - 1) \qquad (3\text{-}29)$$

$$c_p = \gamma R/(\gamma - 1) \qquad (3\text{-}30)$$

مثال رقم ٩ :

وجد ان ٠١ر٠ كجم غاز تام معين تشغل حجم مقداره ٠٠٣ر٠ م^٣ عند ضغط ٧ بار ودرجة حرارة ١٣١^{o}م. احسب الكتله الموليه للغاز.
اذا تمدد الغاز الى ضغط ١ "بار" وحجم ٠٢ر٠م٣ . احسب درجة الحراره النهائيه .

الحل

باستخدام المعادله العامه للغازات والتطبيق فى الظروف الابتدائيه يمكن حساب قيمة الثابت النوعى للغاز (R) كما يلى مع ملاحظة أن :

$$T_1 = 131 + 273 = 404 \text{ K}$$

$$P_1 V_1 = mRT_1$$

$$R = P_1 V_1 / m T_1$$

$$R = (7 \times 10^5 \times 0.003) \div (0.01 \times 404) = 520 \text{ J/kg.K}$$

وباستخدام المعادله التاليه يمكن حساب الكتله الموليه للغاز M

$$R = R_o / M$$

$$M = R_o / R$$

$$\therefore \quad M = 8314 \div 520 = 16 \text{ kg/kg mol}$$

بالتطبيق في المعادله العامه للغازات فى الظروف النهائيه يمكن حساب درجة الحراره النهائيه كما يلى :-

$$P_2V_2 = mR\,T_2$$
$$T_2 = P_2V_2/mR$$

$$\therefore\ T_2 = (1 \times 10^5 \times 0.02) \div (0.01 \times 520) = 384.5\ K$$
$$= 384.5 - 273 = 111.5\ ^oC$$

مثال رقم ١٠ :

غاز تام معين حرارته النوعيه كما يلى :

$$c_p = 0.846 \quad kJ/kg\ K$$
$$c_v = 0.657 \quad kJ/kg\ K$$

احسب الثابت النوعى للغاز والكتله الموليه للغاز

الحل

$$R = c_p - c_v = 0.189 \quad kJ/kg\ K$$
$$R = R_o/M$$
$$\therefore M = R_o/R = 8.314/0.189 = 44\ kg/k\ mol$$

مثال رقم ١١ :

غاز تام له كتله موليه ٢٦ كجم/ك مول وقيمة γ = ٢٦ر١ احسب الحراره المطروده لكل ١ كجم غاز اذا :-

أ- الغار موجود فى وعاء صلب عند ضغط ٣ (بار) ودرجة حرارة ٣١٥°م وتم تبريده حتى ضغط ٥ر١ بار .

ب- دخل الغاز ماسورة على درجة حرارة ٢٨٠°م وينساب مستقرا الى الطرف الآخر للأنبوبة حيث درجة حرارته ٢٠°م . مع اهمال التغير فى السرعه عند الدخول والخروج.

الحل

$$R = R_o/M = 0.3198\ kJ/kg\ K$$
$$c_v = R/(\gamma - 1) = 1.229\ kJ/kg\ K$$
$$c_p = \gamma\ R/(\gamma - 1) = 1.548\ kJ/kg\ K$$

أ- يمكن حساب درجة الحراره النهائيه بالتطبيق فى المعادله العامه للغازات عند الحاله الابتدائيه ثم عند الحاله النهائيه مع ملاحظة ان الحجم ثابت :-

$$p_1v_1 = mRT_1 \quad p_2v_2 = mRT_2 \quad \therefore \; p_2/p_1 = T_2/T_1$$

$$\therefore \; T_2 = 294 \text{ K}$$

∴ الحراره المطروده من كل ١ كجم غاز يتم حسابها كما يلى :-

$$Q = mc_v \; (T2 - T1)$$

$$= (1)\;(1.229)\;(294 - 488) = -361 \quad \text{kJ/kg}$$

الاشاره سالبه لان الحراره مطروده

ب- بتطبيق معادلة السريان

$$h_1 + C_1^2/2 + Q = h_2 + C_2^2/2 + W$$

وباهمال السرعات ، وعدم وجود شغل ينتج ان :

$$h_1 + Q = h_2$$

$$\therefore \; Q = h_2 - h_1 \qquad \therefore \; h = c_pT$$

$$\therefore \; Q = c_p \; (T_2 - T_1) = -403 \quad \text{kJ/ kg}$$

الاجراءات الانعكاسيه Reversible processes

١- الاجراء تحت حجم ثابت :-

من معادلة عدم الانسياب $Q = (u_2 - u_1) + W$

وبالتعويض عن الشغل بصفر حيث لايوجد شغل لعدم تغير الحجم عند ثبات الحجم

$$\therefore Q = U_2 - U_1 \qquad (3\text{-}31)$$

٢- الاجراء تحت ضغط ثابت :-

من معادلة عدم السريان $Q = (U_2 - U_1) + W$

ومن معادلة حساب الشغل $W = p\,(v_2 - v_1)$

$$\therefore \; Q = (U_2 - U_1) + p\,(v_2 - v_1)$$

عند ثبات الضغط

$$Q = h_2 - h_1 \qquad (3\text{-}32)$$

٣- الاجراء عند درجة حرارة ثابته .
من معادلة عدم السريان

$$Q = (U_2 - U_1) + W$$

عند ثبات درجة الحراره لايوجد تغير في الطاقه الداخليه

$$\therefore Q = W = \int pdv \qquad (3\text{-}33)$$

من المعادله العامه للغازات مع ثبوت درجة الحراره يمكن اجراء التكامل والوصول الي :

$$W = pv \ln (v_2 / v_1) \quad \text{or} \quad W = mRT \ln (v_2 / v_1) \qquad (3\text{-}34)$$

ويمكن بالتعويض عن v_2 / v_1 بالقيمه p_1 / p_2

٤- الاجراء الأدياباتيكى عند عدم السريان
يعرف الاجراء الادياباتيكي بأنه الاجراء الذى يتم عندما يكون النظام معزولا عزلا جيدا وبالتالى لاتتسرب أية كمية حرارة من والى النظام .
ومن معادلة عدم السريان بالتعويض عن Q بالصفر ينتج ان :-

$$Q = (U_2 - U_1) + W \qquad (3\text{-}35)$$

تحت الظروف الادياباتيكيه

$$W = U_1 - U_2 \qquad (3\text{-}36)$$

ويمكن رياضيا الوصول إلى المعادله التاليه اذا علمنا ان معادلة الاجراء هى :

$$pv^{\gamma} = \text{Constant}$$

$$W = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (\gamma - 1) \qquad (3\text{-}37)$$

كما يمكن الحصول على الصيغه التاليه :-

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(\gamma - 1)/\gamma} \qquad (3\text{-}38)$$

٥- الاجراء البولتروبى :-
لقد وجد عمليا ان العديد من الاجراءات تقترب من اجراء انعكاسى تبعا للمعادله $(pv^n = C)$ حيث n رقم ثابت بخلاف رقم γ المشار اليها من قبل فى الإجراء الادياباتيكي ويمكن الحصول على المعادله التاليه لحساب الشغل فى حالة الإجراء الانعكاسى البولتروبى:-

$$W = (p_1v_1 - p_2v_2) / (n - 1) \qquad (3\text{-}39)$$

ويمكن الوصول للعلاقه :

$$T_1/T_2 = (p_1/p_2)^{(n-1)/n} \qquad (3\text{-}40)$$

ويجب ملاحظة انه فى هذا الاجراء قد يضاف طاقة الى النظام او قد يفقد طاقة من النظام ولذلك فانه يمكن الوصول الى المعادله التاليه :-

$$Q = [(\gamma - n) / (\gamma - 1)] W \qquad (3\text{-}41)$$

وهى توضح العلاقه بين الشغل والطاقه وقيمة γ ، "n". والشغل يكون موجبا اذا كان الاجراء تمدد وعندئذ قد تكون قيمة n أكبر من γ وبالتالى فالجانب الايمن من المعادله تصبح قيمته سالبه اي ان قيمة Q سالبه وهذا يعنى ان النظام فقد طاقة اما فى حالة ان تكون قيمة 'n' أصغر من γ وبالتالى فالجانب الايمن من المعادله تصبح قيمته موجبه أي ان قيمة Q موجبه وهذا يعني ان النظام اكتسب طاقه . ويمكن الوصول الى عكس هذا الاستنتاج فى حالة مايكون الاجراء انضغاط وبالتالى قيمة الشغل سالبه .

الإجراءات اللانعكاسيه Irreversible processes

سبق تعريف اللانعكاسيه وهى عادة ماتتم فى حالة التمدد الحر Free Expansion وفيها نجد ان الطاقه الداخليه لاتتغير عند مايتم اجراء عزل جيد للنظام وان درجة الحراره فى النهايه تكون مماثله للبدايه الا اننا يمكن ان نطلق عليه اجراء ايزوثرمالى الا انه عند تطبيق القانون العام للغازات فنجد ان $P_1V_1 = P_2V_2$.

كذلك نجد مثال آخر لاجراء اللانعكاسيه وهى ماتعرف بالـ Throtlling وفيها لاتتغير الانثالبى عند اجراء عزل النظام عزلا حراريا جيدا ولذلك تكون درجة الحراره في النهايه مماثله للبدايه للغازات التامه .

الاجراءات الأنسيابيه اللانعكاسيه :-

بالرغم من أنه عادة ماتكون الإجراءات الانسيابيه من الوجهه العمليه اجراءات لانعكاسيه الا انه احيانا مايكون مناسبا افتراضها انعكاسية ويمكن من

معادلة سريان الطاقه المستقر الوصول للمعادله التاليه لحساب الشغل فى حالة اجراء انسيابى انعكاسى ادياباتيكى.

$$W = (h_1 - h_2) + [(C_1^2 - C_2^2)/2] \qquad (3-42)$$

امثله حسابيه

مثال رقم ١٢ :

كمية من الهواء مقدارها ٥ر٠ كجم سخنت عند ضغط ثابت مقداره ٢ "بار" حتي اصبح الحجم ٠٦٥٨ر٠م^3. احسب كمية الحراره المضافه والشغل المبذول مع العلم بأن درجة الحراره فى البدايه ١٣٠^{o}م.

الحل

$$T_2 = p_2 v_2 / mR = 2 \times 10^5 \times 0.0658 / (0.05 \times 0.287 \times 10^3)$$

$$= 917 \text{ K}$$

كمية الحراره المضافه تحت ضغط ثابت نتجت من المعادله

$$Q = m\, c_p (T_2 - T_1) = 0.05 \times 1.005 \; (917 - 403)$$

$$= 25.83 \text{ kJ}$$

الشغل المبذول يحسب كمايلى :-

$$W = p\,(v_2 - v_1)$$

$$= mR\,(T_2 - T_1) = 0.05 \times 0.287 \times 514 = 7.38 \text{ kJ}$$

مثال رقم ١٣ :-

كمية من النيتروجين كتلتها ١ كجم (الكتله المولية ٢٨ كجم/كيلو مول) ضغطت انعكاسيا ايزوثرماليا من ضغط مقداره ١ر٠١ "بار" ودرجة حرارة ٢٠^{o}م الى ضغط ٢ر٤ "بار" بفرض ان النيتروجين غاز تام احسب الشغل المبذول والحراره المنسابه اثناء الاجراء .

الحل

$$R = R_o/M = 8314/28 = 0.297 \quad \text{kJ/kg K}$$

$$W = RT \ln (p_1 / p_2) = -124 \quad \text{kJ/kg}$$

الحراره المنسابه تحسب كمايلى :-

$$Q = W = -124 \ kJ/kg$$

مثال رقم ١٤ :-

هواء عند ضغط ٠٢ر١ "بار" ودرجة حرارة ٢٢°م يشغل اسطوانه حجمها ٠١٥ر٠م٣ تم ضغطها انعكاسيا اديباتيكا بواسطة ضاغط حتي ضغط ٨ر٦ "بار". احسب درجة الحراره والحجم فى النهايه والشغل المبذول وكتلة الهواء . .

الحل

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(\gamma - 1)/\gamma}$$

$$\therefore \ T_2 = 507.5 \ K$$

$$\therefore \ T_2 = 507.5 - 273 = 234.5 \ ^oC$$

$$p_1 v_1 = p_2 v_2$$

$$v_2 = 0.00388 \ m^3$$

$$W = U_1 - U_2 = c_v (T_1 - T_2) = -152.8 \ kJ/kg$$

$$m = p_1 v_1 / RT = 0.0181 \ kg$$

مثال رقم ١٥ :-

ضغط ١ كجم من غاز تام من ضغط ١ر١ بار ودرجة حراره ٢٧°م الي ضغط ٦ر٦ بار تبعا للمعادله $pV^{1.3} = cons.$. احسب كمية الحراره المنسابه من أو إلي جدران الإسطوانه فى الحالات الاتيه :-

أ- الغاز ايثان $c_p = 2.10 \ kJ/kg.^oC, \ m = 30 \ kg/K \ mol$

ب- الغاز ارجون $c_p = 0.52 \ kJ/kg.^oC, \ m = 40 \ kg/K \ mol$

الحل

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(n-1)/n}$$

$$\therefore \ T_2 = 453.6 \ K$$

أ- فى حالة الايثان :- $R = 8.314/30 = 0.277$ kJ/kg K

$$R = c_p - c_v$$

$$\therefore c_v = 1.823 \text{ kJ/kg K}$$

$$\therefore \gamma = c_p / c_v = 1.152$$

$$W = R(T_1 - T_2)/(n-1) = -141.8 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = [(\gamma - n)/(\gamma - 1)]W = +138.1 \text{ kJ/kg}$$

ب- فى حالة الأرجون :

$$R = 8.314/40 = 0.208 \text{ kJ/kg K}$$

$$R = c_p - c_v \quad \therefore c_v = 0.312 \text{ kJ/kg K}$$

$$\gamma = c_p / c_v = 1.667$$

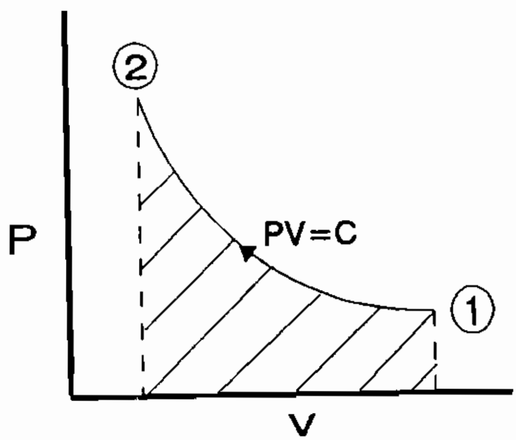
$$W = R(T_1 - T_2)/(n-1) = -106.5 \text{ kJ/kg}$$

$$Q = [(\gamma - n)/(\gamma - 1)]W = -58.6 \text{ kJ/kg}$$

مثال رقم ١٦ :-

ضغط ١ كجم من النيتروجين (الكتله المولية ٢٨ كجم/ك مول) انعكاسيا مع ثبوت درجة الحراره من ١,٠١ "بار" ، ٢٠°م الى ٤,٢ "بار"

احسب الشغل المبذول والحراره المنسابه اثناء الأجراء. افترض ان غاز النيتروجين غاز تام .



الحل

يتم حساب R للنيتروجين كما يلى:

$$R = R_0 / M = 8.314/28 = 0.297 \ kJ/kg$$

الشكل السابق يوضح الاجراء ونلاحظ أن اتجاهه من اليمين الى اليسار لذلك فان الشغل المبذول سالب حيث ان الشغل مبذول على الغاز ويمكن حسابه من المعادله التاليه :

$$W = RT \ \ln (p_1 / p_2)$$

$$= 0.297 \times 293 \times \ln \frac{1.01}{4.2}$$

$$= -124 \ kJ/kg$$

ولما كان الاجراء تحت درجة حرارة ثابته $\therefore W = Q$

اي ان الحراره تم طردها $Q = -124 \ kJ/kg$

مثال رقم ١٧ :-

كمية من الهواء عند ضغط ١٫٠٢ "بار" ، درجة حرارة ٢٢°م تشغل اسطوانه وله حجم ابتدائى ٠٫٠١٥م³ تم ضغط الهواء انعكاسيا وادياباتيكيا بواسطة ضاغط الى ضغط ٦٫٨ " بار" احسب درجة الحراره النهائيه ، الحجم النهائي ، الشغل المبذول على الهواء فى الاسطوانه .

الحل

من المعادله

$$T_1 / T_2 = (p_1 / p_2)^{(\gamma - 1)/ \gamma}$$

يمكن حساب درجة الحراره النهائيه (T_2)

$$\therefore T_2 = 507.5 \quad K$$

ومن المعادله

$$(p_1 / p_2) = (v_2 / v_1)$$

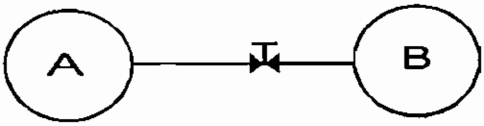
يمكن حساب الحجم النهائي (v_2)

$$\therefore v_2 = 0.00388 \quad m^3$$

ويمكن حساب الشغل المبذول من المعادله :

$$W = (p_1 v_1 - p_2 v_2) / (\gamma - 1) = 2.77 \text{ kJ}$$

مثال رقم ١٨ :



فى الشكل السابق يحتوى الوعاء Aعلى كمية من الهواء تحت ضغط ٢٠ "بار" وحجم ١م^3 وفتح الصمام (x) وتمدد الهواءلشغل الحيز فى الوعائين A,B اذا كان الوعاء (B) له نفس حجم الوعاء (A) ١م^{3}احسب الضغط النهائي للهواء ؟

الحل

عندما يتمدد الغاز التام تمدد حر فان درجة الحراره الابتدائيه T_1 = درجة الحراره النهائيه T_2 ولذلك بتطبيق العلاقه $p_1 v_1 = p_2 v_2$

يتم حساب الحجم النهائي (v_2)

$$v_2 = vA + vB = 1 + 1 = 2 \text{ m}^3$$

$$\therefore p_2 = p_1 v_1 / v_2 = 10 \text{ bar}$$

مثال رقم ١٩ :

توربين غازى يستقبل الغازات من غرفة احتراق عند ضغط ٧ "بار" ودرجة حراره ٦٥٠°م وبسرعة ٩ متر/ث. الغازات تترك التوربين عند ضغط ١ بار وبسرعة ٤٥م/ث. افترض ان التمدد ادياباتيكي انعكاسى . احسب الشغل المبذول لكل ١ كجم غاز . اعتبر ان قيمة γ = ١٫٣٣٣ ، c_p = ١٫١١ ك جول/كجم كلفن .

الحل

وباستخدام معادلة الانسياب لاجراء ادياباتيكى

$$W = (h_1 - h_2) + [(C_1^2 - C_2^2)/2]$$

وبالتعويض عن h من المعادله

$$h = c_p T$$

نحصل علي

$$W = c_p\ (T_1 - T_2) + [(C_1^2 - C_2^2)\ /2]$$

يتم حساب T_2 من المعادله

$$T_1 / T_2 = (P_1 / P_2)^{\gamma\ -1/\gamma}$$

فنجد ان $\therefore T_2 = 567\ K$

∴ بالتعويض في معادلة الشغل نجد ان

$$W = 394.2\ kJ/kg$$

مثال رقم ٢٠ :-

خزان هواء حجمه ٦م٣ وضغطه ١٥ "بار" ودرجة حرارته ٥ر٤٠°م فتح صمام التحكم وسمح لجزء من الهواء للأنسياب الى الجو الخارجي. ثم قفل الصمام حيث انخفض الضغط الى ١٢ بار. احسب كمية الهواء المتسربه من الخزان .

الحل

يمكن حساب كتلة الهواء فى البدايه m من المعادله العامه للغازات كمايلى:

$$m = pv/RT = 100\ kg$$

بفرض ان العمليه تحت اجراء ادياباتيكي يمكن الحصول على درجة الحراره النهائيه T من المعادله :

$$(T/T') = (P/P')^{(\gamma -1)/\gamma}$$

$$\therefore T' = 294.2\ K$$

∴ يمكن حساب كتلة الهواء المتبقيه (m') من المعادله العامه للغازات كمايلي :

$$m' = pv/RT' = 85.3\ kg$$

$$\therefore m = 100 - 85.3 = 14.7\ kg$$

مسائل عامة

أولاً : تمارين على مقدمة الديناميكا الحراريه
حساب الشغل

١- تحتوي اسطوانة على مائع تحت مكبس عند ضغط ١٠ بار اذا علمت ان الحجم الابتدائي لهذا المائع ٠.٥ر.م^{٣}. احسب الشغل المبذول بواسطة المائع عند تمدده انعكاسيا فى الحالات الاتيه :-

أ- عند ضغط ثابت الى حجم نهائي ٢ر.م^{٣}

ب- تبعا لعلاقة خطيه الي حجم نهائي ٢ر.م^{٣} وضغط نهائي ٢ بار

ج- تبعا للمعادله ($PV^{1.2}$ = Constant) إلي حجم نهائي ١ر.م^{٣}

د- نبعا للمعادلة ($PV^{1.2}$ = Constant) الى حجم نهائي ٠.٦ر.م^{٣}

هـ- تبعا للمعادله [$p = (A/V^2) - (B/V)$] الى حجم نهائي ١ر.م^{٣} وضغط نهائي ١ بار مع العلم ان A , B ثوابت .
وضح جميع الاجراءات برسم تخطيطي بين الضغط والحجم.

[**الاجابه** :- أ (١٥٠٠٠٠) ، ب (٩٠٠٠٠) ، جـ (٣٤٦٥٧) ، د (٧٦٣٩) ، هـ (١٩٢.٦) نيوتن. متر].

٢- مائع كتلته ١ كجم تم ضغطه انعكاسيا تبعا للمعادله ($pv = 0.25$) حيث "p" الضغط معبرا عنه بوحدات "بار" و "v" هى الحجم النوعى معبرا عنها بوحدات م^{٣}/كجم. الحجم النهائي مساويا ١/٤ الحجم الابتدائي .
المطلوب : حساب الشغل المبذول على المائع مع توضيح الاجراء برسم تخطيطي للعلاقه بين الضغط والحجم [**الاجابه** : ٣٦٥٧ نيوتن.متر].

٣- تحتوي اسطوانه على ٠.٥ر.م^{٣} غاز تحت مكبس عند ضغط ٩ر٦ "بار" تمدد هذا الغاز انعكاسيا تبعا للمعادله $P.V^{1.2}$ = Constant حتي وصل الحجم ٠.٨ر.م^{٣} احسب الشغل المبذول بواسطة الغاز مع توضيح الاجراء برسم تخطيطي يبين العلاقه بين الضغط والحجم [**الاجابه** : ١٥٤٧٦ نيوتن.متر]

٤- تمدد ١ كجم مائع انعكاسيا تبعا لعلاقة خطيه من ضغط ٢ر٤ "بار" الى ٤ر١ "بار" وكان الحجم الابتدائي ٠٠٤ر٠م^{3} والحجم النهائي ٠٢ر٠م^{3}. بعد ذلك تم تبريد المائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت. وفي النهايه تم ضغطه انعكاسيا تبعا للمعادله pV=Constant حتي وصل الى نقطة البدايه حيث الضغط ٢ر٤ "بار" والحجم ٠٠٤ر٠م^{3} . احسب الشغل المبذول في كل اجراء محددا اذا كان الشغل مبذول بواسطة المائع أو عليه . احسب الشغل الصافي للدوره . وضح الاجراءات المختلفه على رسم تخطيطي يوضح العلاقه بين الضغط والحجم .
[**الاجابه** : ٤٤٨٠. ، -١١٢٠. ، -١٨٤٦ ، ١٥١٤ نيوتن.متر]

٥- مائع حجمه ٠٩ر٠م^{3} وضغطه ٧ر٠ بار تم ضغطه انعكاسيا الى ضغط ٥ر٣ بار تبعا للمعادله PV^n = Constant . ثم سخن الغاز انعكاسيا تحت حجم ثابت حتي ضغط ٤ "بار" وكان الحجم النوعي عندئذ ٥ر٠م^{3}/كجم. تم اعادة المائع إلي حالته الاصليه بتمدده انعكاسيا تبعا للمعادله (pV^2 = Constant) .
احسب كتلة هذا المائع ، وقيمة "n" في الاجراء الاول ، والشغل الصافي الذي بذل بواسطة المائع أو عليه في تلك الدوره . ارسم رسم تخطيطي للدوره يوضح العلاقه بين الضغط والحجم .
[**الاجابه** : ٧٥٣٠.ركجم ، ٨٤ر١ ، ٨٥٤ نيوتن.متر]

٦- سخن مائع انعكاسيا تحت ضغط ثابت ٠٥ر١ "بار" حتي اصبح حجمه النوعي ١ر٠م^{3}/كجم. عندئذ ضغط انعكاسيا تبعا للمعادله (pV = Constant) حتي صار الضغط ٢ر٤ بار ، ثم سمح له بالتمدد انعكاسيا تبعا للمعادله ($pV^{1.3}$=Constant) ، وفي النهايه تم تسخينه تحت حجم ثابت ليعود الي حالته الاصليه. ولقد وجد ان الشغل المبذول فى الاجراء عند ثبات الضغط ٥١٥ نيوتن.متر وكتلة المائع ٢ر٠كجم.
احسب الشغل الصافي المبذول بواسطة المائع أو عليه في تلك الدوره ارسم رسم تخطيطي يوضح العلاقه بين الضغط والحجم.
[**الاجابه**: -٤٢٢ نيوتن.متر].

ثانياً : تمارين على الإجراءات الانعكاسيه واللاانعكاسيه

١- وعاء صلب يحتوى على ١ كجم هواء عند ضغط ٨ر٤ "بار" ودرجة حرارة ١٥٠°م. تم تسخين الوعاء حتى ارتفعت درجة الحراره الى ٢٠٠°م. احسب الضغط النهائي فى الوعاء وكمية الحراره المضافه اثناء عملية الاجراء .
[**الاجابه** : ٣٧ر٥ "بار" ، ٩ر٣٥ كيلوجول/كجم].

٢- تمدد الاكسجين (الكتله الموليه ٣٢ كجم/ك.مول) انعكاسيا فى اسطوانة خلف مكبس مع ثبات الضغط ومقداره ٣ "بار" . الحجم الابتدائي ٠١ر٠م^{٣} وأصبح فى النهايه ٠٣ر٠م^{٣}. درجة الحراره الابتدائيه ١٧°م. احسب الشغل المبذول بواسطة الاكسجين وكمية الحراره من او إلى جدران الاسطوانه اثناء عملية التمدد. افترض ان الاكسجين غاز تام وله c_p = ٩١٧ر٠ كيلوجول/كجم كلفن .
[**الاجابه** : ٦ كيلوجول ، ١٦ر٢١ كيلوجول]

٣- غاز تام حجمه ٠٥ر٠ متر مكعب عند ضغط ٢ر٦ "بار" ينخفض ضغطه الي ٠٥ر١ "بار" في اجراء انعكاسى مع ثبوت درجة الحراره . احسب كمية الحراره المنسابه من او الي الغاز .
[**الاجابه** : ٤٤ر٥٦ كيلوجول]

٤- تم ضغط ١ كجم من الهواء انعكاسيا وتحت درجة حرارة ثابته مقدارها ٣٠°م من ضغط ١ "بار" . احسب الشغل المبذول على الهواء وكمية الحراره المنسابه من او الي الهواء .
[**الاجابه** : ٩٦ر١٢٩ كيلوجول/كجم ، - ٩٦ر١٢٩ كيلوجول/كجم].

٥- كمية هواء كتلتها ١ كجم عند ضغط ١ "بار" ودرجة حرارة ١٥°م. ضغطت انعكاسيا وادياباتيكيا حتى ضغط ٤ "بار". احسب درجة الحراره النهائيه والشغل المبذول على الهواء .
[**الاجابه** : ١٥٥°م ، ٥ر١٠٠ كيلوجول/كجم]

٦- تمدد النيتروجين (الكتله الموليه ٢٨ كجم/ك مول) انعكاسيا في اسطوانه معزوله حراريا تماما من ضغط ٥ر٣ "بار" ، درجة حرارة ٢٠٠°م الى حجم ٠٩ر٠م^{٣} اذا علمت ان الحجم الابتدائي ٠٣ر٠م^{٣} . احسب الشغل المبذول اثناء عملية التمدد . افترض ان غاز النيتروجين غاز تام وله c_p = ٠٤١ر٧٤١ر٠ كيلوجول/كجم كلفن.

[**الاجابه** : ٣١ر٩ كيلوجول]

٧- ضغط غاز تام معين انعكاسيا من ضغط ١ "بار" ، ١٧°م الي ضغط ٥ "بار" في اسطوانه معزوله حراريا تماما . درجة الحراره النهائيه ٧٧°م. الشغل المبذول على الغاز اثناء الانضغاط ٤٥ك. جول/كجم. احسب قيمة γ ، c_v ، R والوزن الجزئي النسبي للغاز .

[**الاجابه:** ١٣٢ر١ ، ٧٥ر٠كيلوجول/كجم كلفن ، ٠٩٩ر٠ كيلوجول/كجم كلفن،٨٤]

٨- كمية هواء مقدارها ١ كيلو جرام عند ضغط ٠٢ر١ بار ودرجة حرارة ٢٠°م تم ضغطها انعكاسيا تبعا للمعادله ($pv^{1.3}$ = constant) الى ضغط ٥ر٥ "بار" . احسب الشغل المبذول على الهواء وكمية الحراره المنسابه من او الي جدران الاسطوانه اثناء الانضغاط.

[**الاجابه:** ٥ر١٣٣ كيلوجول/كجم ، ٣٨ر٣٣ كيلوجول/كجم]

٩- ضغط غاز الاكسجين (الكتله الموليه ٣٢ كجم/ك.مول) انعكاسيا وبولي تروبيكالى فى اسطوانه من ٠٥ر١ "بار" ، ١٥°م الي ٢ر٤ "بار" بطريقة مـا بحيث يتم طرد ٣/١ الشغل المضاف علي صورة حرارة الي جدران الاسطوانه احسب درجة الحراره النهائيه للأكسجين بفرض ان الاكسجين غاز تام وله c_v = ٦٤٩ر٠ كيلو جول/كجم كلفن.

[**الاجابه:** ١١٣°م]

١٠- كمية من غازثاني اكسيد الكربون مقدارها ٥ر٠ كجم (الكتله الموليه ٤٤ كجم/ك.مول) تشغل حجم ٣ر٠ متر مكعب عند ضغط ٠٢٥ر١ "بار". تم ضغطها انعكاسيا حتي ضغط ١٥ر٦ "بار". احسب درجة الحراره النهائيه ، الشغل المبذول على الغاز ، كمية الحراره المنسابه من او الي جدران الاسطوانه .

أ- عندما يتم الأجراء تبعا للمعادله ($pv^{1.4}$ = constant) .

ب- عندما يتم الأجراء مع ثبوت درجة الحراره.

ج- عندما يتم الأجراء فى اسطوانة معزوله حراريا تماما .

افرض ان غاز ثاني اكسيد الكربون غاز تام واعتبر γ = ٣ر١.

[**الاجابه:** ٢٧٠ °م ، ١٣٨ر٥ كيلوجول ، ٧١٣ر١ كيلوجول ، ٦ر٥٢ °م ، ٥١ر٥كيلوجول ، -٥١ر٥ كيلوجول ، ٢١٩ °م ، ٢٥ر٥ كيلوجول ، صفر كيلوجول]

١١- هواء عند ضغط ٩ر٦ "بار" ، درجة حرارة ٢٦٠ °م تم خنقه لضغط ٥ر٥ "بار" قبل تمدده خلال فوهة خرطوم الى ضغط ١ر١ "بار" افترض ان الهواء ينساب انعكاسيا انسياباً مستقر خلال فوهة الخرطوم ولايحدث طرد للحراره . احسب سرعة الهواء عند خروجه من فوهة الخرطوم عندما تكون سرعة دخوله ١٠٠متر/ثانيه .

[**الاجابه:** ٦٢٧ متر/ثانيه]

١٢- هواء عند درجة حرارة ٤٠ °م يدخل غرفة خلط بمعدل ٢٢٥ كجم/ساعه حيث يتم خلطه مع هواء درجة حرارته ١٥ °م بمعدل ٥٤٠ كجم/ساعه . احسب درجة حرارة الهواء عند تركه غرفة الخلط . افرض ظروف انسياب مستقر . افرض ان كمية الحراره المفقوده يمكن اهمالها .

[**الاجابه:** ٤ر٢٢ °م]

١٣- **تحتوي اسطوانة صلبه علي غاز الهليوم (الكتله الموليه ٤ كجم/ك.مول) عند ضغط ٥ "بار" ودرجة حرارة ١٥ °م. تم توصيل الاسطوانه مع مصادر ضخ للهليوم عند ضغط ١٠ "بار" ودرجة حرارة ١٥ °م وتم قفل الصمام الموصل بالاسطوانه عندما ارتفع الضغط بالأسطوانه الي ٨ "بار" . احسب درجة الحراره النهائيه للهليوم فى الاسطوانه بفرض ان كمية الحراره المنتقله خلال اجراء العمليه صغير ويمكن اهماله . قيمة c_v للهليوم ١٢ر٣ كيلوجول/كجم كلفن .**

[**الاجابه:** ٥ر٦١ °م]

١٤- يحتوي خزان هواء علي ١٠ كيلوجرام من الهواء عند ضغط ٧ "بار" به صمام فتح خطأ وتم قفله ثانيه في خلال ثواني الا ان الضغط انخفض الي ٦ "بار" . احسب كتلة الهواء التي هربت من الخزان مع توضيح أى فروض تأخذهـــا واحسب ايضا ضغط الهواء فى الخزان بعد ان يمر بعض الوقت بعد قفل الصمام لكى تكون درجة حرارة الهواء قد عادت إلي درجة الحراره الاصليه .
[**الاجابه**: ٤٠ر١ كجم ، ٢٧ر٦ "بار"]

١٥- اسطوانه رأسيه مساحة مقطعها ٦٤٥٠ مم^{٢} مفتوحه من أحد طرفيها للجو ومتصله من الطرف الاخر عن طريق ماسورة وصمام بخزان هواء كبير تم تثبيت مكبس بالاسطوانه لا احتكاك له يزن ١٠٠ نيوتن وكان الحجم الابتدائي للأسطوانه صفر . تم فتح الصمام وسمح للهواء بالمرور ببطىء من الخزان الكبير إلي الاسطوانه حتي تحرك المكبس ببطء مسافة ٦ر٠ م وعندئذ قفل المحبس. اذا كانت درجة حرارة الهواء فى الاسطوانه ٣٠°م عند نهاية العمليه ودرجة الحراره للهواء في الخزان الكبير ثابته عند ٩٠°م احسب :-

أ- ضغط الهواء فى الاسطوانه اثناء العمليه.
ب- الشغل المبذول بالهواء في الاسطوانـــه.
ج- الشغل المبذول علي المكبس.
د- الحراره المنتقله من او الي الهواء في الاسطوانه اثناء العمليه .

اعتبر ضغط الهواء الجوى ٠١٣ر١ "بار"
[**الاجابه**: ٦٨ر١ "بار" ، ٤٥٢ جول ، ٦٠ جول ، -٢١٠ جول]

ثالثاً : تمارين علي القانون الاول للديناميكا الحراريه

١- يقوم مكبس هواء بعملية الضغط مع ثبوت الطاقه الداخليه ، ويتم طرد ٥٠ كيلو جول إلي ماء التبريد لكل ١ كجم هواء. احسب الشغل اللازم لشوط الانضغاط لكل رطل من الهواء [**الاجابه** : ٥٠ كيلو جول/كجم].

٢- وجد ان الشغل المبذول في شوط الانضغاط على الغاز بواسطة مكبس ٧٠ كيلوجول/كجم وكمية الحراره المطروده الي ماء التبريد ٤٢ كيلوجول/كجم. احسب التغير في الطاقه الداخليه وحدد اذا كان حدث اكتساب أو فقد فيها .
[**الاجابه** : تم اكتساب ٢٨ كيلوجول/كجم].

٣- كتلة من غاز لها طاقه داخليه ١٥٠٠ كيلوجول موجوده في اسطوانه معزوله تماما حراريا تمدد الغاز خلف مكبس حتي اصبحت طاقته الداخليه ١٤٠٠ كيلوجول احسب الشغل المبذول بواسط الغاز .

اذا علمت ان التمدد تم تبعا للمعادله (pV^2 = constant) وان الضغط الابتدائي للغاز ٢٨ "بار" والحجم الابتدائي للغاز ٠٦ر٠م^3 ، احسب الضغط والحجم في نهاية الاجراء.

[**الاجابه** : ١٠٠٠ كيلوجول ، ٠٦ر٤ بار ، ١٤٨ر٠م^3]

٤- وجد ان الغازات في اسطوانة آلة احتراق داخلى لها طاقه داخليه ٨٠٠ كيلوجول/كجم وحجم نوعي ٠٦ر٠م^3/كجم عند بداية التمدد . افترض ان التمدد انعكاسيا تبعا للمعادله $pV^{1.5}$ من ضغط ٥٥ "بار" الي ٤٠ر١" بار" الطاقه الداخليه بعد التمدد ٢٣٠ كيلوجول/كجم. احسب كمية الحراره المطروده/كجم غازات الي ماء تبريد الاسطوانه اثناء شوط التمدد .

[**الاجابه**: ٢ر١٠٤ كيلوجول/كجم]

٥- محرك بخاري يدخله البخار بمعدل ٣٥ر١ كجم/ثانيه وينتج ٥٠٠ كيلووات. كمية الحراره المفقوده بين جداره يمكن اهمالها.

أ- احسب التغير في الانثالبي النوعي عبر المحرك عند اهمال سرعة دخول وخروج البخار وكذلك الفرق في الارتفاع عند الدخول والخروج.

ب- احسب التغير في الانثالبي النوعي عبر المحرك عندما يكون سرعة دخول البخار ٦٠ متر/ث وسرعة خروجه ٣٦٠م/ث ومستوي ماسورة الدخول أعلي من ماسورة العادم ٢ متر .

[**الاجابه** : ٤ر٣٧٠ كيلوجول/كجم ، ٤ر٤٢٣ كيلوجول/كجم]

٦- يدخل البخار بانسياب مستقر الي مكثف وقيمة الانثالبي له ٢٣٠٠ كيلوجول/كجم وسرعته ٣٥٠م/ث ، بعد تكثيفه يخرج وقيمة الانثالبي له ١٦٠ كيلوجول/كجم وسرعته ٧٠م/ث.

احسب كمية الحراره المنتقله الي ماء التبريد لكل كجم بخار مكثف .

[**الاجابه**: ٨ر٢١٩٨ كيلو جول/كجم]

٧- محرك بخاري يعمل تحت ظروف الانسياب المستقر يدخله البخار بالحاله التاليه: الضغط ٨ر١٣ "بار" - الحجم النوعي ١٤٣ر٠م^3/كجم - الطاقه

الداخليه ٢٥٩٠. كيلوجول/كجم - السرعه ٣٠ م/ث . ويخرج البخار من المحرك بالحاله التاليه : الضغط ٣٥ر. "بار" - الحجم النوعي ٣٧ر٤ م^3/كجم الطاقه الداخليه ٢٣٦٠. كيلوجول/كجم - السرعه ٩٠ م/ث .
تفقد الحراره للجو المحيط بمعدل ٢٥ر. كيلوجول/ث ، ومعدل انسياب البخار ٣٨ر. كجم/ث . احسب القدره المتحصل عليها من المحرك .
[الاجابه : ٩٨ر١٠٢ كيلووات].

٨- تعتبر فوهة فم الخرطوم وسيله لزيادة سرعة تيار لمائع ينساب مستقرا . ولقد وجد ان قيمة الانثالبي لمائع عند دخوله فوهة فم الخرطوم ٣٠٢٥ كيلوجول/كجم والسرعه ٦٠ متر/ث . ولقد وجد ان الانثالبي للمائع عند خروجه ٢٧٩٠. كيلوجول/كجم.
فوهة فم الخرطوم أفقيه والحراره المفقوده منه يمكن اهمالها
أ- اوجد سرعة خروج المائع.
ب- اذا كانت مساحة الدخول ١ر. م^2 والحجم النوعي للمائع عند الدخول ١٩ر م^3/كجم. احسب معدل انسياب المائع .
ج- اذا كان الحجم النوعي للمائع عند الخروج ٥ر.م^3/كجم . احسب مساحة الخروج .
[الاجابه : ٢ر٦٨٨ م/ث ، ٦ر٢١ كجم/ث ، ٢٣٠.ر م^2]

رابعاً : تمارين علي Working Fluid

استخدم القيم التاليه للهواء :-
- الثابت العام النوعي للهواء "R" ٢٨٧ر. كيلوجول/كجم كلفن
- الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت "c_p" ٠٠٥ر١ كيلوجول/كجم كلفن
- الحراره النوعيه تحت حجم ثابت " c_v " ٧١٨ر. كيلوجول/كجم كلفن

النسبه بين الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت " γ " ٤ر١ وللغازات التامه الاخري يتم حساب تلك القيم باستخدام المعلومات المعطاه في التمرين.

١- الوزن الجزيئي النسبي لغاز ثاني اكسيد الكربون ٤٤ ، وجد في احدي التجارب أن قيمة " γ " له ٣ر١. افرض ان غاز ثاني اكسيد الكربون غاز "تام" ، احسب الثابت العام النوعي للغاز "R" والحراره النوعيه تحت ضغط ثابت وتحت حجم ثابت . [الاجابه : ١٨٩ر. ، ٦٣٠.ر. ، ٨١٩ر. كيلوجول/كجم كلفن ، ٠٢٨.ر. م^3].

٢- احسب الطاقه الداخليه والانثالبى لـ ١كجم هواء يشغل ٤٠ر٠م^{٣} عند ٢٠ "بار" اذا علمت ان الطاقه الداخليه ازدادت ١٢٠ كيلوجول/١كجم بازدياد ضغط الهواء إلي ٥٠ بار ، احسب الحجم الجديد الذي يشغله ١ كجم من الهواء.

[**الاجابه** :١٠٦ر٢٥٠ كيلوجول/كجم ، ١٧ر٣٥٠ كيلوجول/كجم، ٢٩٦٠ر٠م^{٣}].

٣- وعاء من الصلب سعته ٤٠ر٠م^{٣} مخزن به غاز **الاكسجين** عند ضغط ٢٠٠ "بار" ودرجة حرارة ٢٠^{٥}م . بفرض ان **الاكسجين** غاز تام . احسب كتلة **الاكسجين** المخزنه في الوعاء اذا علمت ان الوعاء مزود بصمام امان ضد ارتفاع الضغط حيث ينصهر الصمام عندما ترتفع درجة الحرارة . احسب درجة الحراره التي يجب ان ينصهر عندها الصمام حتي يحد من ارتفاع الضغط في الوعاء الي ٢٤٠ "بار" .الكتلة الموليه للأكسجين هي ٣٢ كجم/كيلومول.

[**الاجابه**: ٥١ر٩م^{٣} ، ٦ر٧٨^{٥}م].

٤- عند تسخين غاز تام معين تحت ضغط ثابت من درجة حرارة ١٥^{٥}م الي درجة حرارة ٩٥^{٥}م فانه يحتاج الي كمية حرارة مقدارها ١١٣٦ كيلوجول/كجم. وعند تسخين نفس الغاز تحت حجم ثابت من والي نفس درجات الحراره المذكوره فانه يحتاج الي كمية حرارة مقدارها ٨.٨ كيلوجول/كجم. احسب كلامن c_p ، c_v ، γ ، R ، الوزن الجزيئي النسبي للغاز.

[**الاجابه**: ١٢ر١٤ كيلوجول/كجم كلفن ، ١ر١٠ كيلوجول/كجم كلفن ، ٤٠٦ر١ ، ١ر٤ ، كيلو جول/كجم كلفن ، ٢٨٠٢].

٥- مكبس هواء يدخله الهواء عند ضغط ١ "بار" ويتركه عند ضغط ٥ "بار" ودرجة حرارة الهواء عند دخوله الي المكبس ١٥^{٥}م وحجم الهواء عند بداية الانضغاط ٣ امثال حجمه عند نهاية الانضغاط . احسب درجة حرارة الهواء عند خروجه من المكبس ومقدار الزياده في الطاقه الداخليه لكل ١ كجم هواء.

[**الاجابه**: ٢٠٧^{٥}م ، ٨٦ر١٢٧ كيلوجول/كجم].

٦- تم ضغط كمية غاز تام معين من حالة ابتدائيه حيث حجمه ٨٥٠ر٠م^{٣} وضغطه ١ بار الي حالة نهائيه حيث حجمه ٢٤٠ر٠م^{٣} وضغطه ٩ر٣ "بار" الحرارة النوعيه تحت حجم ثابت ٧٢٤ر٠ كيلوجول/كجم كلفن ، الحراره النوعيه

تحت ضغط ثابت ٢.٠ر١ كيلوجول/كجم كلفن . لوحظ ارتفاع في درجة الحراره مقداره ١٤٦ كلفن . احسب الثابت العام النوعي للغاز "R" ، كتلة الغاز الموجوده ، مقدار الزياده في الطاقه الداخليه للغاز .
[**الاجابه:** ٢٩٦ر. كيلوجول/كجم كلفن ، ٧٩.ر كجم ، ٣١٦ر٨ كيلوجول].

الدورات الحرارية والقانون الثانى للديناميكا الحرارية

يبين القانون الأول أن الحرارة والشغل صورتان من صور الطاقة يمكن تحويل كل منهما إلى الأخرى كما حدد طريقة ربطهما ببعض عن طريق عامل كمي (المكافىء الميكانيكى للحراره) . وأمكننا القانون الأول من تعريف الطاقة المخزنه كما أوضح العلاقة بين الشغل والحراره والتغير فى الطاقة الداخلية للمجموعة.

ولكن لم يضع القانون الأول أى حدود لإمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى. فالشغل يمكن أن يتحول تماماً إلى طاقة والعكس . ولكن فى الآلات الحرارية نجد أن جزءاً فقط من الطاقة الحرارية المضافة يمكن أن يتحول إلى شغل ميكانيكى مفيد بينما يخرج جزء آخر كبير من هذه الطاقة من الآله الحراريه مفقوداً فى صورة دخان عادم أو بخار ثانوى أى أن المحتوى الحرارى لماده الشغل (بخار أو غاز) لايمكن الاستفادة منها تماماً بدون فاقد وذلك لأن مادة الشغل تخرج من الآله على درجة حراره أعلى من درجة حراره الوسط الجوى المحيط بحيث أننا نجد أن هناك فرقاً كبيراً بين درجة حرارة العوادم الخارجة ودرجة حراره الصفر المطلق أى أن هناك فرق فى المحتوى الحرارى كان يمكن استغلاله فى عمليات تحول الطاقة ولكن هذا الجزء من الطاقة لازال مهدراً وبالتالى تكون الاستفادة غير كاملة .

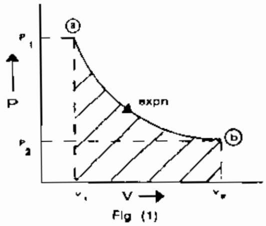
ولدراسه القانون الثانى لابد من التعرف أولاً علىّ كيفية عمل الآله الحراريه وعلى التعرف على الإجراءات العكسية والغير عكسية ومنها يمكن التوصل إلى صيغ مختلفه للتعبير عن القانون الثانى للديناميكا الحرارية.

الآله الحرارية Heat Engine

هى إداة تعمل على تحويل الحراره إلى شغل خارجي وتتكون الآله الحراريه عادة من اسطوانه معزولة الجوانب (ماعدا قاعدة الأسطوانه) لها مكبس حر الحركة ويتحرك بدون إحتكاك ويوجد بداخل الأسطوانه مادة تسمى ماده التشغيل Working Substance ومادة التشغيل يمكنها أن تمتص (تكتسب) أو تطرد كمية من الحرارة وتقوم بعمل شغل (مكتسب أو مبذول) وذلك بتمددها أو بانضغاطها أى بتغيير حجمها.

والموائع وعلى الأخص الغازات مثل الهواء أو البخار أو موائع التبريد (فريون ، أمونيا ، ركلين..الخ) من أفضل المواد التى تستخدم كمادة تشغيل حيث أن التغير فى حجمها يكون أكبر من المواد الصلبة والسائلة ، واستجابتها لتغير حجمها عند التأثير عليها بقوى خارجية يكون سريعاً.

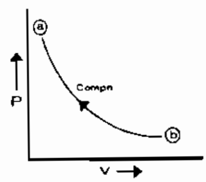
وعند عمل الآله الحرارية فإن درجة حرارة مادة التشغيل او الشغل (الغاز) تتراوح بين درجة حراره قصوى يصل إليها الغاز عند تلامسه بمصدر حرارى ساخن Source وبين درجة حراره صغرى تكون هى درجة حراره مكثف بارد (مصب أو بالوعه حرارية) Sink .



شكل (٣-٦) تمدد غاز داخل الاسطوانه

وكما عرفنا سابقاً فإن الشغل الذى يبذله الغاز عند تمدده من النقطه a حيث الحجم V_1 والضغط P_1 إلى النقطة b حيث الحجم V_2 والضغط P_2 يعطى بالمعادلة

$$W\ (\text{exp. } a - b) = \int_{v1}^{v2} pdv \qquad (3\text{-}43)$$



شكل (٣-٧) انضغاط غاز داخل الاسطوانه

وقيمة هذا الشغل يساوي المساحة تحت المنحنى شكل (٣-٦) ولكى يمكننا تكرار نفس هذه العملية لكى نحصل على نفس قيمة شغل التمدد Wفلابد من رجوع الغاز إلى حالتـه الأولى حيث الضغط P_1 والحجم V_1 (شكل ٣-٧) أى أنه لابد من ضغط الغاز وبهذا فإن الغاز يكون قد قام بعمل دورة حرارية فى عملية ضغط الغاز فلابد بالطبع من بذل شغل على الغاز من أى مصدر خارجى وتكون قيمة هذا الشغل

$$W\ (\text{comp } b - a) = \int_{v2}^{v1} pdv = - \int_{v1}^{v2} pdv \qquad (3\text{-}44)$$

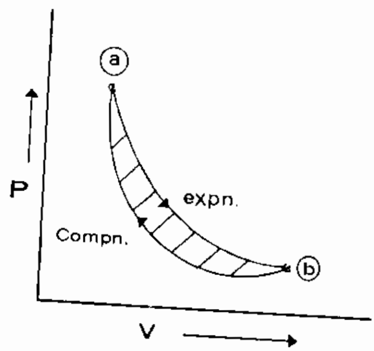
وحيث أن الشغل هو داله للعملية الديناميكية الحرارية أى يتوقف على المسار بين نقطتى البداية والنهاية فإن قيمتى Wb-a comp & Wa-b exp سوف تعتمد على مسار كل من عمليتى التمدد والضغط (حيث أن الشغل يساوى المساحه تحت المنحنى والمسار)

ويكون الشغل الكلى الناتج من دورة واحدة مساويه لـ :

$$W_c = W \ exp\ (a - b) - W \ comp\ (b - a) \qquad (3\text{-}45)$$

فاذا انطبق منحنى التمدد على منحنى الضغط فإن الشغل الكلى الناتج أو الذى يمكن الحصول عليه من الدورة يكون مساوياً صفر . أى أن:

$$W_c = O\ , \quad W \ exp\ (a - b) = W \ comp\ (b - a) \qquad (3\text{-}46)$$



شكل (٣-٨) دورة لتمدد وانضغاط الغاز

أما إذا كان منحنى التمدد أعلى منحنى الانضغاط (شكل ٣-٨) فإن الشغل الكلى الناتج من الدورة يكون مقداراً موجباً ويكون مساوياً للمساحه بين المنحنيين وحيث أن الغاز يصل فى نهاية الدورة إلى حالته الأصلية $(P,v,t)_0$ فإن التغير فى درجة حرارته = صفر وبالتالى يكون التغير فى طاقته الداخلية مساوياً صفر $\Delta U = O$ وطبقاً للقانون الأول للديناميكا الحرارية فإن صافى الشغل Wc الناتج عن الدورة هو

$$Wc = Q1 - Q2\ , \quad Wc = \Delta Q$$

أى أن الشغل الناتج من الدورة يكون مساوياً لكمية الحراره المعطاه لماده الشغل (الغاز) مطروحاً منها كمية الحرارة المفقودة من مادة الشغل (الغاز) بمعنى أن جزء

من الحراره المعطاه للغاز يتحول إلى شغل والباقى يفقد.
وتعرف الكفاءه الحراريه للآله أو الجودة الحراريه بالتالى :

الجوده الحراريه = الشغل المبذول / كمية الحراره المعطاه أى أن :

$$\eta = \frac{W_c}{Q_1} \qquad (3\text{-}47)$$

حيث Q_1 هى كمية الحراره التى امتصها الغاز من المصدر الساخن ، W_c هو الشغل الخارجى الذى بذله الغاز

$$\eta = \frac{Q_1 - Q_2}{Q_1} \qquad (3\text{-}48)$$

وفى معادلة الجوده الحراريه يجب أن تكون وحدات W_c هى نفس وحدات Q_1

العمليات القابلة للعكس والغير قابله للعكس
Reversible and Irreversible Processes

إن مفهوم قابلية العكس أو عدم قابلية العكس للعمليات المختلفة من أهم مفاهيم الديناميكا الحرارية . فإن أكبر مطامع المهندسين المشتغلين بعلوم الطاقة هو إمكانية تحويل الطاقة من صورة إلى أخرى بدون أن يفقد جزء منها إلى الوسط المحيط . فإذا أجريت عملية فى اتجاه معين من a إلى b ثم أجريت فى الاتجاه العكسى من b إلى a وعادت مادة الشغل إلى حالتها الإبتدائية من حيث الضغط ودرجة الحرارة دون أن يحدث للوسط المحيط أى تغيرات فيقال أن هذه العملية قابلة للعكس Reversible فمثلا إذا أجريت عملية فى اتجاه معين من a إلى b وامتصت كمية من الحرارة Q من الوسط الخارجى فإن تنفيذ إجراء العملية فى الاتجاه العكسى منb إلى a يجب على مادة الشغل أن تطرد نفس كمية الحراره Q إلى الوسط الخارجى أو اذا بذلت مادة الشغل شغلاً موجباً خلال حركتها من a إلى b فيجب عند اجراء العملية فى الاتجاه العكسى من b إلى a أن يبذل عليها نفس مقدار الشغل حتى تعود إلى حالتها الأصلية .

فحركة بندول الساعه مثلاً تعتبر من الناحية النظرية عملية عكسية فبعد مدة زمنية معينه من حركة البندول فانه يعود إلى وضعه الإبتدائي (حالته الأصلية) بدون أن تحدث تغيرات معينه فى الوسط المحيط .

ولنأخذ مثال آخر للعمليات العكسية :
عند ضغط مائع التبريد المستخدم فى وحدات التبريد (فريون أو أمونيا أو ركلين) من ضغط منخفض إلى ضغط مرتفع فإن شغلاً من الخارج يتم بذله لتحريك الضاغط. فإذا تم الانتهاء من ضغط المائع وأريد إرجاع الاجراء وعكسه بحيث يتم عمل نفس المقدار من الشغل المبذول إلى الوسط المحيط فإنه يمكن أن يقال أن المائع مر بدورة عكسية .

ولكن هذا غير واقعى ولايحدث فى الحياه العملية حيث إن جزءاً من الطاقة يفقد بالاحتكاك ويحد من جعل الاجراء عكسياً تماماً.
وبرغم أن الإجراء العكسي صعب التوصل اليه عملياً إلا أن المهندسين يعتبرونه الإجراء المثالى (المعيارى) ويحاولون أن يجعلوا من كل اجراءات تحويل الطاقة اجراءات عكسية بقدر ما أمكن ذلك عملياً.
لذلك تكون العملية غير قابلة للعكس عندما تجرى فى إتجاه معين a إلى b ثم تجرى فى إلاتجاه العكسي من b إلى a فلاتعود مادة الشغل إلى حالتها الأصلية أو أن يحدث تغيرات للوسط المحيط ومن أمثله العمليات الغير قابلة للعكس :

١- الإحتكاك : فمثلاً عند توقف قطار أو سيارة فإن طاقة الحركة للقطار تتحول إلى طاقة حرارية فى جهاز الفرملة مما يرفع من درجة حراره الفرامل ومن غير المعقول طبعاً أن يمكن للقطار أن يتحرك مرة ثانية عند تبريد الفرامل فالاحتكاك الذي حدث يعتبر طاقة مفقودة غيرت من الوسط المحيط.

٢- إنتقال الحرارة من جسم لآخر عند وجود فرق فى درجات الحراره بينهما فبعد الوصول إلى حاله الاتزان الحرارى فإنه يصعب إنتقال الحراره فى الاتجاه العكسي لأن اتجاه الانتقال الحرارى محدد باتجاه واحد وكذلك الحال فى حالة اتزان الضغوط أو التركيزات .

٣- التمدد الحر : فإذا تمدد غاز مثلاً داخل أسطوانه فيكون هذا الاجراء غير انعكاسى بسبب وجود إحتكاك بين المكبس والاسطوانه أو لسبب إثارة الغاز داخل الأسطوانه وبالتالى تبقى بالمجموعه كمية من الطاقة أكبر .

٤- عمليات الخلط : تتم عمليات الخلط للسوائل والعجائن مثلاً باضافة شغل ميكانيكى من الخارج مما يؤدى إلى تسخين المخلوط ورفع الطاقة الداخلية له ولكن لايمكن تخزين الطاقة المضافة (الشغل الميكانيكى) داخل المخلوط إلى وقت آخر لحين استخدامه لشغل يمكن طرده من مجموعه السائل لذلك يطلق على الشغل المضاف شغل موزع أو متفرق وتطبق عليه المعادلة التالية :

$$W_{12} = U_2 - U_1 = W_{add} \qquad (3-49)$$

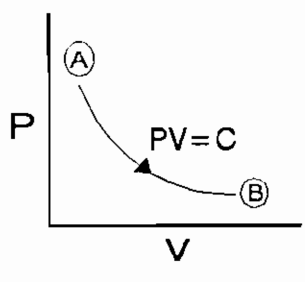
ويمكن أن يطلق عليها شغل إحتكاكي أو طاقة إحتكاكية .
وعموماً يمكن أن يقال إنه إذا تم الإجراء ببطء quasi - static وبدون احتكاك فإنه يمكن أن يكون اجراء عكسياً أما اذا تم بسرعه Non quasi-static فإنه يكون اجراء لاعكسياً.
والدورة الحرارية التى تتكون منها كل الاجراءات أو العمليات الديناميكية الحرارية القابلة للعكس تسمى دورة قابلة للعكس انعكاسيه اما الدورة الحرارية التى تكون فيها بعض أو كل العمليات الديناميكية الحرارية غير قابلة للعكس فهي دورة غير قابلة للعكس والجودة الحرارية للدورة الانعكاسية تمثل اقصي درجة كفاءة يمكن الحصول عليها اذا ما قورنت بالدورات الحقيقية.

دورة كارنوت المثالية Ideal Carnot Cycle

تعتبر دورة كارنوت مثالا هاماً لكل الدورات الحرارية الأخرى . وهى تعتبر دورة مثالية ولكن خيالية لايمكن تحقيقها عملياً ولكن تعتبر النتائج المستخلصه منها ذات أهمية كبرى لكل الدورات الحرارية .
ويمكن اجراء دورة كارنوت بواسطة غاز مثالى بواسطة أربعة اجراءات عكسية هي:

١- إجراء تمدد ذو درجة حرارة ثابته Isothermal Expansion
٢- إجراء تمدد أديباتيكى(بدون فقد أو اكتساب حراره) Adiabatic Expansion
٣- إجراء انضغاط ذودرجة حرارة ثابته Isothermal Compression
٤- إجراء انضغاط أديباتيكى Adiabatic Compression

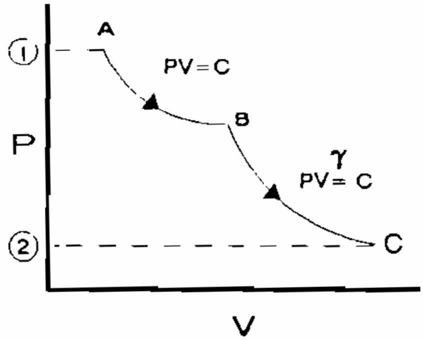
ويوضح الشكل (٣-٩) مسار دورة كارنوت على خريطة الضغط والحجم P-V Diagram وتتم الدورة بين كل من النقاط A , B , C , D حيث تحدث لها الإجراءات التالية :-



شكل (٣-٩) تمدد الغاز

١- يوجد الغاز داخل أسطوانه متصله بمصدر حرارى لانهائي درجة حرارته T_1 ضغطه P_A وحجمه V_A وينتج عن ذلك أن الغاز يتمدد تحت ظروف أيزوسيرماليه (ثبوت درجة الحراره إلى P_B ، V_B) تحت نفس درجة الحرارة إلى أن يصل إلى الحالة B وتكون كمية الحرارة المضافة = الشغل الذي بذله الغاز

$$Q_1 = W_1 = P_1V_1 . \ln \frac{V_2}{V_1} = m.R.T_1 . \ln \frac{V_B}{V_A} \qquad (3\text{-}50)$$

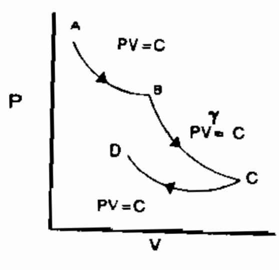


شكل (٣-١٠) اجرائى تمدد الغاز

٢- عندما يصل الغاز إلى الحالة B يتم ايقاف إضافة الطاقه الحرارية من المصدر الحرارى وتعزل أسطوانه الغاز تماماً عن الجو المحيط بها.

ويترك الغاز ليتمدد أديباتيكيا إلى أن يصل إلى الحالة رقم 2 (شكل ٣-١٠) وينخفض درجة الحرارة من T_1 إلى T_2 ويزيد الحجم إلى V_C وينخفض الضغط إلى P_C وخلال هذا التغير يكون الغاز قد بذل شغلاً موجباً.

$$Q_2 = W_2 = P_2V_2 . \ln \frac{V_D}{V_C} = m.R.T_2 \ln \frac{V_D}{V_C} \qquad (3\text{-}51)$$

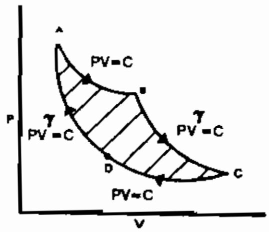


شكل (٣-١١) اجراءات تمدد وانضغاط الغاز

٣- عندما يصل الغاز إلى الحالة C يتم توصيل الأسطوانه مع مستودع حرارى لانهائي بارد درجة حرارته T_2 ثم يضغط الغاز أيزوسيرماليا عند درجة حرارة T_2 وتكون كمية الشغل المبذولة W_2 مساوية لكمية الحرارة المطرودة من الغاز Q_2 إلى المستودع الحرارى اللانهائي (شكل ٣-١١)

$$Q_2 = W_2 = mR\ T_2\ \ln \frac{V_D}{V_C} \qquad (3\text{-}52)$$

ويقل حجم الغاز إلى V_D ويرتفع الضغط إلى P_D.



شكل (٣-١٢) الدورة الكاملة

٤- عندما تصل حاله الغاز إلى الحالة D تفصل الاسطوانه عن المستودع الحرارى اللانهائي البارد ثم تعزل تماماً ويستمر ضغط الغاز أديباتيكيا إلى أن يقل حجم الغاز ويصل إلى الحجم الابتدائي V_A وترتفع درجة الحرارة من T_2 إلى T_1 والضغط من P_D إلى P_A وبذلك تتم الدورة ويصل الغاز إلى حالته الإبتدائية.(شكل ٣-١٢)

الجودة الحرارية لدورة كارنوت :

حيث أن الطاقة الداخلية للغاز المثالى تعتمد فقط على درجة الحرارة فإننا نجد أن الطاقة الداخلية (U) للغاز فى بداية دورة كارنوت تتساوى مع الطاقة الداخلية له فى نهاية الدورة وبالتالى فإن $(\Delta U = 0)$. وطبقاً لذلك فإن معادلة القانون الأول للديناميكا الحرارية تؤدى إلى

$$Q_1 = W + Q_2$$

ويكون صافى الطاقة الحرارية المضافة Q أثناء الدورة هو عبارة عن المجموع الجبرى لكل من :-

- الطاقة الحرارية Q_1 المضافة أثناء الإجراء الأول :

$$Q_1 > O$$

- الطاقة الحرارية Q_2 المطرودة أثناء الإجراء الثالث

$$Q_2 < O$$

وبالتالى تكون نسبة Q (مع مراعاه الإشارات) :

$$Q = Q_1 + Q_2$$

وكذلك قيمة الشغل لها :

$$W = Q_1 + Q_2$$

وحيث أن الجودة الحرارية لجميع الآلات الحرارية تعرف على أنها ناتج قسمه الطاقة المستفادة (ويقصد بها هنا فى هذه الحالة الشغل W) علي الطاقة الحرارية المضافة (هنا كمية الحرارة Q_1) والتى يكتسبها المائع عند درجة الحرارة المرتفعه أى أن :-

$$\eta = \frac{W}{Q_1} \qquad (3-53)$$

وحيث أن :

$$W = Q_1 + O_2$$

$$\eta = \frac{Q_1 + Q_2}{Q_1}$$

وبالتعبير عن كل من Q_1 ، Q_2 بالمعادلات المحددة لقيمة كل منها نجد أن :-

$$\eta = \frac{mRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + mRT_2 \ln \frac{V_D}{V_C}}{mRT_1 \ln (V_B/V_A)} \qquad (3.54)$$

وحيث أن التغير من B إلى C ومن D إلى A يتم خلال الدورة أديباتيكيا

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_C}{V_B}$$

$$\frac{T_1}{T_2} = \frac{V_D}{V_A}$$

ومن هذه العلاقة نستخلص أن :

$$\frac{V_C}{V_B} = \frac{V_D}{V_A}$$

أى أن

$$\frac{V_B}{V_A} = \frac{V_C}{V_D}$$

وبالتعويض عن قيمة الحجوم فى معادلة (٣-٥٤)

$$\eta = \frac{mRT_1 \ln \frac{V_B}{V_A} + mRT_2 \ln \frac{V_B}{V_A}}{mRT_1 \ln (V_B / V_A)} \qquad (3\text{-}55)$$

وبعد الاختصار نجد ان معادلة الكفاءة الحرارية تؤدى الى

$$\eta = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \qquad (3\text{-}56)$$

$$\eta = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (3\text{-}57)$$

ومن هنا يتضح لنا أن :-

١- الجودة الحرارية لدورة كارنوت المثالية العكسية تعتمد على درجتى الحراره فقط T_1، T_2 والتى تعمل بينهما الدورة .

٢- وتزداد قيمة η كلما زاد الفرق بين درجات الحرارة ($T_1 - T_2$) وكلما انخفضت درجة الحرارة T_2 .

٣- يمثل معامل الجودة الحرارية لدورة كارنوت اكبر قيمة لجميع الآلات الحرارية الأخرى فإذا امكننا التوصل الى أن تكون $T_2 = 0$ (درجة حرارة الصفر المطلقة)

فإنه يمكننا تخيليا الوصول بقيمة $\eta = 1$ وبالتالى يمكننا تحويل كل الطاقة الحرارية الى شغل ميكانيكي ولكن هذا غير ممكن عملياً فى الحقيقه .

قاعدة هامة

بينما يمكن تحويل الطاقة الميكانيكية دائماً بالكامل إلى طاقة حرارية فإن التحويل الكامل لكل الطاقة الحرارية إلى طاقة ميكانيكية من خلال دورة حرارية أى بواسطة آله حرارية مستمرة غير ممكن حتى تحت أحسن الظروف المثالية

منطوق القانون الثانى للديناميكا الحراريه :

ومما سبق يمكن التعبير عن منطوق القانون الثانى للديناميكا الحراريه بأحد الصيغ الآتيه :

١- ليس من المعقول أن تصمم آلة حراريه تعمل فى دورة ولاتنتج أى أثر غير استخلاص الطاقه الحراريه من خزان كبير وتحويلها كلها الى شغل مساو لها.
٢- لايمكن نقل الحراره من جسم ذو درجة حرارة منخفضه إلى آخر ذو درجة حراره مرتفعه إلا بإستخدام شغل خارجى .
٣- يستحيل على أى جهاز يعمل طبقا لدورة أن ينتج ضغطا مع تبادل الحراره مع أجسام عند درجة حرارة متساويه.

وهذا القانون ليس استنتاجا من القانون الأول حيث أن القانون الأول ينفى استحداث أو إفناء الطاقه فى حين أن القانون الثانى يحدد احتمالات استخدام الطاقه فى صور معينه . فإنه من المعلوم إمكانية تحويل جميع الطاقه الميكانيكيه (الشغل) إلى طاقه حراريه بدون أى حدود ولكنه لايمكن تحويل الطاقه الحراريه إلى شغل بدون طرد جزء من هذه الطاقه الحراريه إلى مايحيط بالمجموعه.

قيمة القانون الثانى :

١- تعيين أقصى قيمة للجودة الحراريه لآلة حراريه تعمل تحت ظروف معينه.
٢- تعيين أقصى قيمة لمعامل أداء ثلاجة أو وحدة تبريد.
٣- احتمالات حدوث أى إجراء.
٤- تحديد الاتجاه الذى يمكن أن يتخذه أى إجراء.
٥- تعريف مقياس لدرجة الحراره لايعتمد على الخواص الطبيعيه لأى مادة.
٦- تحديد العلاقات بين الخواص الطبيعيه للمواد.

مثال :-

استخدم واحد كجم هواء لتشغيل دورة كارنوت فإذا كان الضغط الإبتدائى للهواء ١٦ بار ودرجة حرارته ٥٢٧°م وبعد التمدد الأيزوسير مالى انخفض الضغط إلى ٨ بار (نقطة B) وكان اقل قيمة ضغط فى الدورة = ١.٦ بار احسب كل من :-
١- الضغوط والحجوم السائدة عند كل من النقاط الأربعه للدورة (A - D) .
٢- كميات الحراره المضافة والمطروده Q_1 , Q_2 .
٣- معامل الأداء الحرارى للدورة أو الجودة الحراريه للدورة.

الحـــــل

المعطيات : $P_A = 16\ bar = 16 \times 10^5\ N/m^2$

$t_A = 527\ ^oC = 800\ K$

$P_B = 8\ bar = 8 \times 10^5\ N/m^2 \quad , \quad P_C = 1.6\ bar = 1.6 \times 10^5\ N/m^2$

$R = 287\ Nm/kg.K = 0.287\ kJ/kg.K \quad , \quad \gamma = 1.4$

$$V_A = \frac{RT_1}{P_1} = \frac{287 \times 800}{16 \times 10^5} \quad \frac{N.m.\ \ K.m^2}{kg.\ \ K.N.}$$

$$= 0.1435\ m^3/kg$$

$$V_B = \frac{V_A \cdot P_A}{P_B} = 0.1435 \times \frac{16}{8} = \frac{m^3.bar}{kg.bar}$$

$$= 0.287\ m^3/kg$$

من النقطة B الى النقطة C يتم التمدد أديباتيكيا

$$\frac{T_B}{T_C} = \left(\frac{P_B}{P_C}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}}$$

$$\frac{T_B}{T_C} = \left(\frac{P_B}{P_C}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \left(\frac{(8)}{1.6}\right)^{0.286} = 1.583$$

$$T_c = \frac{T_B}{1.583} = \frac{800}{1.583} = 505\ K$$

وبالتالى فإن الحجم عند الحاله ٢:

$$V_2 = \frac{RT_C}{P_C} = \frac{287 \times 505}{16 \times 10^5} \quad \frac{N.m.\ \ K.m^2}{kg.K.N}$$

$$= 0.0906\ m^3/kg$$

عند النقطة D نجد أن الإجراء من D إلى A أديباتيكيا

$$\left(\frac{P_A}{P_D}\right)^{\frac{\gamma-1}{\gamma}} = \frac{T_A}{T_D}$$

$$\frac{P_A}{P_D} = \left(\frac{T_A}{T_D}\right)^{\frac{\gamma}{\gamma-1}}$$

$$\frac{P_A}{P_D} = \left(\frac{800}{505}\right)^{\frac{1.4}{0.4}} = 5 \quad , \quad P_D = \frac{16'}{5'} = 3.2 \quad bar$$

وكذلك يمكن ايجاد الحجم عند النقطة D كالاتى :

$$V_D \; V_D = \frac{V_c \cdot P_c}{P_D} = \frac{0.9006 \times 1.6}{3.2} \quad \frac{m^3.bar}{kg.\,bar}$$

$$= \quad 0.0453 \quad m^3/kg.$$

كمية الحرارة المضافة Q_1 عند A يتم إضافتها فى دورة كارنوت عند درجة حراره ثابتة $T_1 = T_A$

$$\therefore \; Q_1 = W_1 = RT_1 \; \ln \left(P_A/P_B \right)$$

$$= \quad 0.287 \times 800 \times \ln \; (16/8) \quad kJ/kg$$

$$= \; 159.1 \quad kJ/kg$$

(اشارة الحراره موجبه ∴ حراره مكتسبه)

كمية الحراره المطروده Q_2 عند ٢ يتم طردها عند درجة حراره ثابته $T_2 = T_C$

$$\therefore \quad Q_2 = W_2 = RT_2 \; \ln \left(P_C/P_D \right)$$

$$= \quad 0.287 \times 505 \ln \; (1.6 /3.2)$$

$$= -100.4 \quad kjoule/kg$$

الاشارة هنا سالبه ∴حراره مفقوده

∴ الشغل المستفاد فى الدورة هو الجمع الجبرى لـ : $W_C = Q_1 + Q_2$

(ومع الاحتفاظ بالاشارات)

$$= \quad 159.1 \; - \; 100.4 \quad = \; + \; 58.7 \qquad kJ/kg$$

$$\therefore \eta_c = \frac{W}{Q_1} = \frac{58.7}{159.1} = 0.369$$

$$= 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{100.4}{159.1} = 0.369$$

$$\text{or} \quad \eta_c = 1 - \frac{T_0}{T_1}$$

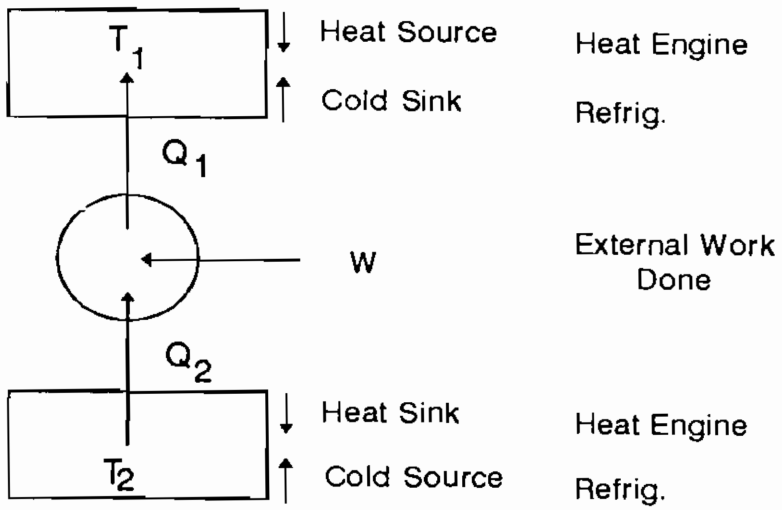
$$= 1 - \frac{505}{800} = 0.369$$

دورة آله التبريد والمضخة الحرارية

إذا اعتبرنا غرفة التبريد الخاصة بحفظ الأغذية انها مجموعه ثرموديناميكية درجة حرارتها أقل من درجة حرارة الوسط المحيط بالمجموعة وللمحافظة على درجة الحرارة المنخفضة داخل الحجرة (المجموعه الثرموديناميكية) فإنه يجب باستمرار امتصاص الحراره من المادة الغذائية الموجودة داخل الغرفه ثم طرد هذه الحراره الي الوسط المحيط عند درجة حراره هى اعلى دائماً من درجة حراره الغرفة .

وبدلاً من اكتساب شغل فى حالة آله المضخه الحراريه فإنه يلزم فى آله التبريد بذل شغل ميكانيكي W من خارج المجموعه الثرموديناميكية لنزع كمية حراره Q_2 من غرفه التبريد والتي تمتص من خزان حراري ذو درجة حراره منخفضه T_2 وطردها Q_1 الي خزان حرارى اخر ذو درجة حراره مرتفعه T_1 (الوسط المحيط) وطبقاً لهذا المبدأ بنيت نظرية عمل الثلاجة المنزلية وكذلك ثلاجات الحفظ بالتبريد والتجميد.

ويبين الشكل التالى (شكل ٣-١٣) رسماً تخطيطياً لأجزاء آله التبريد:



شكل (٣-١٣) رسم تخطيطى لدورتى التبريد ومضخة الحرارة

ومن الشكل السابق نستنتج أن كمية الحراره المضافة الي المجموعة من غرفه التبريد أو من الوسط المحيط بها تزيد من المحتوي الحراري لمادة الشغل العاملة فى آله التبريد (مائع التبريد) فى صورة Q_2 ويمكن الرمز الي كمية الحراره Q_2 ايضاً على انها كمية البرودة المتولدة وتصبح Q_2 هنا هي القدرة التبريدية وعادة ما يستخدم الفريون او الامونيا كمائع تبريد.

بعد اضافة الشغل الميكانيكى الخارجى W الى مائع التبريد فإن المائع يطرد كمية حراره Q_1 الى الوسط المحيط .

وطبقاً للقانون الأول للديناميكا الحراريه فإن :

$$Energy_{in} = Energy_{out}$$

$$Q_2 + W = Q_1 \qquad (3\text{-}58)$$

أى أن مجموع كل من الحراره المضافة والشغل الميكانيكى المضاف يساوى كمية الحراره المطرودة فى الدورة الحرارية .

ويعرف معامل الأداء بالنسبه للثلاجه أو وحدة التبريد بأنه النسبه بين كمية الحراره المزاله وكمية الشغل اللازم إضافته.

$\therefore$ Coefficient of Performance = C.O.P

$$C.O.P = \frac{Q_2}{W} = \frac{Q_2}{Q_1 - Q_2} = \frac{Q_2/Q_1}{1-(Q_2/Q_1)} \qquad (3\text{-}59)$$

ويعرف معامل الاداء بالنسبه لمضخة الحراره بأنه النسبه بين كمية الحرارة المضافه وكمية الشغل اللازم لذلك :

$$C.O.P = \frac{Q_1}{W} = \frac{Q_1}{Q_1 - Q_2} = \frac{1}{1-(Q_2/Q_1)} \qquad (3\text{-}60)$$

ويلاحظ أن معامل الأداء لمضخة حرارة هو مقلوب الجودة الحراريه لآلة حرارية مناظرة أى أنه يكون دائما أبدا أكبر من الواحد الصحيح.

الأنتروبيا أو قصور الطاقه : Entropy

وجدنا من دورة كارنوت النظريه ذات الاجراءات المعكوسه أنه يمكن التعبير عن الجودة الحراريه كالآتى :-

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} = 1 - \frac{T_2}{T_1} \qquad (3\text{-}61)$$

حيث أن :

Q_2 = كمية الطاقه الحراريه المطرودة من الدوره عند درجة حرارة T_2

Q_1 = كمية الطاقه الحراريه المضافه فى الدورة عند درجة حرارة T_1

وعلى ذلك نجد أن :

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{T_2}{T_1} \qquad (3\text{-}62)$$

or

$$\frac{Q_2}{T_2} = \frac{Q_1}{T_1} \qquad (3\text{-}63)$$

وبما ان قيمة Q_1 تكون سالبه حيث أنها ممتصه من الجو المحيط ، قيمة Q_2 تكون موجبة حيث أنها مطرودة إلى المحيط الخارجى .

$$\therefore \quad \frac{Q_2}{T_2} = - \frac{Q_1}{T_1} \qquad (3\text{-}64)$$

$$\therefore \quad \frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} = \Sigma \frac{Q}{T} = 0 \qquad (3\text{-}65)$$

ويمكن اثبات هذه النتيجة لأى دورة معكوسه وذلك بتقسيم الدورة المعكوسه إلى عدد كثير من دورات كارنوت النظريه بواسطة منحنيات شبه متلاصقه، كمية الحرارة المتبادله فيها مقسومه على درجة الحراره المطلقه مساويه للصفر. فإذا جمعنا هذه الطاقه فى النهايه بالتكامل حول حدود الدورة نحصل على الآتى:

$$\sum \frac{dQ}{T} = 0$$

$$\int \frac{dQ}{T} = 0$$

ويسمى خارج القسمه $ds = \frac{dQ}{T}$ لأى اجراء معكوس بالأنتروبيا أو قصور الطاقه فى هذا الاجراء Entropy.

فإذا فرض أنه يوجد لدينا دورة غير معكوسه Irreversible كما هى الحالة فى الدورات الحقيقيه ، فيكون :

$$\eta = 1 - \frac{Q_2}{Q_1} < 1 - \frac{T_2}{T_1} \tag{3-66}$$

وذلك لأن الجودة الحراريه النظريه لدورة كارنوت تكون أكبر من أى جودة حرارية لدورة أخرى حقيقيه تعمل بين حدى درجات الحرارة T_2 و T_1 .

$$\therefore \frac{Q_2}{Q_1} > \frac{T_2}{T_1}$$

$$\text{or} \quad \frac{Q_2}{T_2} > \frac{Q_1}{T_1}$$

أو باستخدام الاشارة الجبرية الصحيحه للطاقه المضافه Q_1

$$\therefore \frac{Q_2}{T_2} > - \frac{Q_1}{T_1} \tag{3-67}$$

$$\frac{Q_1}{T_1} + \frac{Q_2}{T_2} > 0 \tag{3-68}$$

$$\sum \frac{Q}{T} > 0 \tag{3-69}$$

$$\text{or} \quad \sum \frac{dQ}{T} > 0 \tag{3-70}$$

لذلك نجد أن قيمة التغير فى الانتروبيا

$$ds = \sum \frac{dQ}{T} > O \qquad (3\text{-}71)$$

وعلى ذلك يمكن تلخيص نتيجة القانون الثانى للديناميكا الحراريه بأن :

للاجراء المعكوس $ds = O$

للاجراء الغير معكوس (الحقيقى) $ds > O$

ضواغط الغازات GAS COMPRESSORS

الغازات المضغوطه لها استخدامات كثيرة فى عمليات تصنيع الاغذيه والالبان. فمثلا ضاغط الغازات يمثل جزء مهم من وحدة التبريد الصناعى بالضغط حيث يستخدم الضاغط فى ضغط الغاز (النشادر او الفريون ١٢ أو الركلين ...) لرفع درجة حرارة تكثيفه . ويستخدم كذلك الهواء المضغوط فى عملية تجفيف اللبن مثلا بطريقة الرش . وهناك نوعان من ضواغط الغازات :

١- ضواغط ترددية : Reciprocating Compressors

وهى تتكون من اسطوانه بها مكبس (ضاغط) يتحرك داخلها بواسطة طاقة خارجية (موتور كهربائى مثلا) . ويدخل الغاز الاسطوانه فى عملية السحب عن طريق صمام السحب او الدخول ويقوم الضاغط بضغط الغاز الى الضغط المطلوب حيث يخرج الغاز المضغوط عن طريق صمام الخروج . واذا كان دخول الغاز من جهة واحدة من الضاغط (البستم) يسمى الضاغط مفرد التأثير Single acting واذا كان دخول الغاز من جهة بحيث يقوم الضاغط بضغط الغاز من الجهة الاخرى بالتناوب يسمى الضاغط ثنائى التأثيرDouble acting . وفى العمليات الصناعيه التى تستخدم ضغوطا مرتفعه نوعا ما، يضغط الغاز فى اسطوانة الضغط المنخفض Low Pressure Cylinder ويستقبل الغاز المضغوط فى خزان يبرد من الخارج بواسطة ماء Intercooler وتقوم اسطوانة الضغط المرتفع High Pressure Cylinder بسحب الغاز من الخزان لتعيد ضغطه الى ضغط مرتفع . ويسمى الضاغط فى هذه الحاله بالضاغط متعدد المراحل Multi-Stage Compressor .

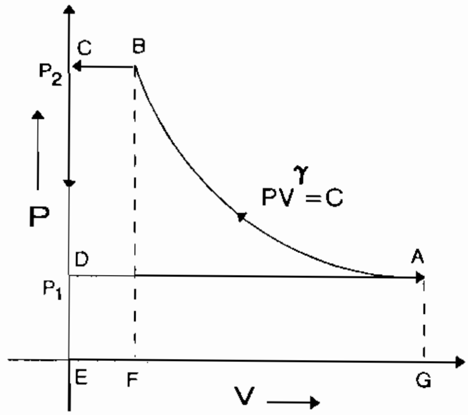
٢- الضواغط الدورانيه Rotary Compressors

والنوع الشائع الاستعمال منها هى الضواغط الطاردة المركزيه Centrifugal Compressors وتتكون هذه الضواغط من قرص مروحة مقسم الى ريش منحنيه بطريقة معينه ، ويتحرك القرص Impeller داخل غلاف خارجى يسمى Diffuser وفائدته تحويل الطاقة الناتجة عن السرعه العالية للغاز (قوة الطرد المركزيه) الى طاقة ضغط . والضواغط الطاردة المركزيه تدور على سرعات مرتفعة اعلى بكثير من الضواغط الترددية .

وهذه عادة ما تستخدم فى ضغط كميات كبيرة من الغاز تحت ضغوط متوسطة ويمكن زيادة الضغط الناتج بتعدد مراحل الانضغاط واستخدام مبردات متوسطة

ومراوح الغازات ما هى الا ضواغط طاردة مركزية تعمل على ضغوط منخفضة (اقل من واحد رطل قوه على البوصه المربعه) وسوف يجىء ذكرها فيما بعد .

الدوره النموذجيه او النظريه لضاغط ذو مرحلة واحده :



شكل (٢-١٤) الدورة النموذجية لضاغط ذى مرحله واحدة

وتتكون الدورة من :

١- سحب كمية من الغاز داخل اسطوانة الضاغط تحت ضغط ثابت P_1 تمثل بالاجراء DA.

٢- ضغط الغاز ادياباتيكيا من حالة A الى الحاله B أى رفع الضغط الى P_2 ، ويتبع هذا الاجراء القانون :

$$Pv^{\gamma} = C$$

٣- طرد الغاز المضغوط الى خزان الاستقبال تحت ضغط ثابت P_2 ويمثلها الاجراء BC

٤- انخفاض فى الضغط من P_2 الى P_1 وبعدها تبدأ دورة جديدة بسحب كمية اخرى من الغاز .

بالاشارة الى الرسم البيانى للدورة شكل(٢-١٤)، يكون الشغل اللازم لضغط الغاز لكل دورة كما يأتى :

Work needed = Area ABCD

= ABFG + BCEF - ADEG

$$\text{Work needed} = \frac{P_2V_2 - P_1V_1}{\gamma - 1} + P_2V_2 - P_1V_1$$

$$= \frac{\gamma P_2V_2 - \gamma P_1V_1}{\gamma - 1}$$

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} (P_2V_2 - P_1V_1)$$

$$W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1V_1 \left[\frac{P_2V_2}{P_1V_1} - 1 \right]$$

ولكن

$$P_1V_1^{\gamma} = P_2V_2^{\gamma}$$

$$\therefore \frac{V_2}{V_1} = \left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{-\frac{1}{\gamma}}$$

$$\therefore \quad W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right] \quad (3\text{-}72)$$

مثال :

ضاغط هواء ترددى مفرد التأثير ذو اسطوانه واحدة قطرها ١٥سم وطول مشوار مكبس الضاغط ٢٤سم. استخدم لضغط كمية من الهواء أديباتيكيا من ضغط مطلق مقداره واحد بار ودرجة حرارة ١٧°م إلى ضغط مطلق مقدارة ٦ بار. احسب القدرة الحصانيه النظريه اللازمه لتشغيل الضاغط إذا كان عدد لفات عمود الادارة الرئيسى ١٠٠ لفه/دقيقه.

احسب كذلك كمية الهواء المضغوطه فى الدقيقه .

$$\gamma = 1.4, \quad R = 287 \ \text{Nm/kg. K}$$

الحل :

$$\text{Work} \quad W = \frac{\gamma}{\gamma - 1} P_1V_1 \left[\left(\frac{P_2}{P_1}\right)^{\frac{\gamma - 1}{\gamma}} - 1 \right]$$

$$V_1 = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$= \frac{\pi}{4} X \left(\frac{15}{100}\right)^2 X \left(\frac{24}{100}\right) = 0.00424 \ m^3$$

$$W = \frac{1.4}{1.4-1} (1 X 0.00424) X 10^4 \left[\left(\frac{6}{1}\right)^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right]$$

$$= \frac{1.4}{0.4} x \ 1 X 0.00424 X 10^4 \left[6^{\frac{1.4-1}{1.4}} - 1 \right]$$

$$= 148.4 \ [(6)^{0.286} - 1]$$

$$= 148.4 \ [1.6 - 1]$$

$$W = 89 \quad kg.m/rev.$$

$$H.P. = \frac{W.n}{const.} = \frac{89x100}{4500}$$

$$H.P = 1.98 \quad hp$$

ومن القانون العام للغازات

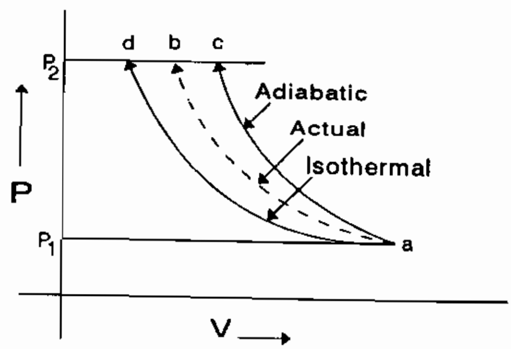
$$P_1V_1 = m.R.T_1$$

$$\therefore m = \frac{(1x10^5)(0.00424) X r.p.m}{(287)(273+17)}$$

$$\therefore m = \frac{424}{(287)(290)} X 100 \quad kg/min.$$

$$m = 0.51 \quad kg/min$$

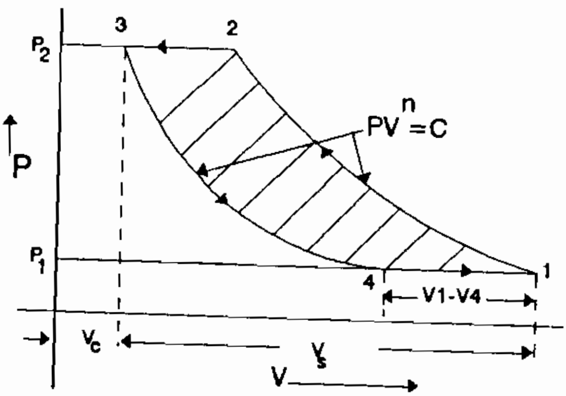
شغل الضاغط :



شكل (٣-١٥) اجراءات إنضغاط الغاز فى دورة الضاغط

كما هو موضح فى شكل (٢-١٥) يمثل المنحنى a-b اجراء الضغط لكمية من غاز من ضغط P_1 الى P_2 ويعتمد نوع الاجراء abعلى كمية الحرارة المزالة من الغاز اثناء اجراء الانضغاط بدون تبادل حرارى كالاجراء a-c كان هذا الاجراء اديباتيكيا واذا ازيلت كمية من الحرارة من الغاز اثناء هذا الانضغاط بحيث تظل درجة الغاز ثابته كان الاجراء ايزوسيرمالى كما فى الاجراء a-d. ولكن فى الواقع يتم اجراء الضغط طبقا للاجراء العام $PV^n=C$ ثابت ، ويمثله المنحنى a-b ولما كان اجراء ثبوت درجة الحرارة هو اقل اجراءات الانضغاط المذكورة الذى يستلزم شغلا لذلك تعتبر الدورة التى يتم فيها الانضغاط بثبوت درجة الحرارة دورة مثاليه .

حجم الخلوص وجودة الامتلاء الظاهريه :



شكل (٢-١٦) حجم الخلوص فى دورة الضاغط

افترض فى جميع ماسبق ذكره ان ضاغط الغاز ذو مرحلة واحدة وبدون حيز خلوص ولكن فى الضواغط الحقيقيه لابد من ترك حيز خلوص يسمح بتركيب الصمامات وحتى يمكن تفادى اصطدام المكبس بغطاء الاسطوانه (شكل ٢-١٦). وعلى ذلك فانه يتبقى فى الاسطوانه بعد ضغط الغاز كمية من الغاز المضغوط تشغل حيز الخلوص عند الحالة 3. وعندما يعكس المكبس حركته تتمدد هذه الكميه طبقا للاجراء 3-4 حتى اذا ما وصل ضغط الغاز داخل الاسطوانه الى ضغط السحب P_1 يفتح صمام السحب ويدخل الغاز الجديد وبذلك لايشغل جميع حجم الشوط اى انه تقل كمية الغاز التى تدخل الى الضاغط اثناء شوط السحب ونتيجة لذلك يقل شغل الدورة ويصبح :

$$W = \frac{n}{n-1} P_1 (V_1 - V_4) [(\frac{P_2}{P_1})^{\frac{n-1}{n}} - 1] \qquad (3\text{-}73)$$

وذلك بفرض ان أس منحنى الانضغاط والتمدد يكون واحدا.

ويسمى الحجم $(V_1 - V_4)$ بالحجم الفعال للشوط ويؤدى وجود حيز الخلوص الى تقليل كمية الهواء المسلمه ويترتب على ذلك ان يلزم زيادة الشغل المطلوب لادارة الضاغط او استخدام ضاغط ذو سعة اكبر حتى تعطى كمية الهواء المضغوطه نظريا بضاغط بدون حيز خلوص.

وتسمى النسبه بين الحجم الفعال للشوط الى حجم الشوط جودة الامتلاء الظاهريه اى ان:-

Apparant Volumetric Efficiency $(\eta_{vol.ap})$

$$\eta_{vol.ap} = \frac{V_1 - V_4}{V_{st}} \qquad (3\text{-}74)$$

وجودة الامتلاء الظاهريه ليست مقياسا لكتلة الغاز الفعليه المضغوطه حيث انها لاتدخل فى الاعتبار اختلاف ظروف الغاز عند نهاية شوط التمدد عن ظروف الغاز عند الدخول الى الضاغط - وكذلك ماقد يتسرب من غاز اثناء التمدد والانضغاط داخل الضاغط وعلى ذلك تعرف جودة الامتلاء الفعليه بأنها تساوى

Actual Volumetric Efficiency $(\eta_{vol.ac.})$

$$\eta_{vol.ac.} = \frac{\text{Mass of actual compressed Volume}}{\text{Mass of swept volume at inlet conditions}} \qquad (3\text{-}75)$$

وفى الضواغط التى يمكن اهمال تسرب الغاز منها وبفرض أن ضغط السحب يساوى الضغط عند نهاية شوط التمدد 4-3 فانه :-

$$\eta_{vol.ac.} = \eta_{vol.ap.} \frac{T_o}{T_1} \qquad (3\text{-}76)$$

حيث T_o = درجة حرارة الغاز عند المدخل (تعتبر عادة ٢٠°م او ٦٨°ف).

الباب الرابع

سريان الموائع

Flow of Fluids

ويقصد بالموائع المواد القابله للانضغاط مثل الغازات والمواد الغير قابله للانضغاط مثل السوائل . وفى كلا الحالتين ينحكم فى السريان القوانين الاساسيه الآتيه :

١- قانون ثبوت الكتله Conservation of Mass

٢- قانون ثبوت الطاقه Conservation of Energy

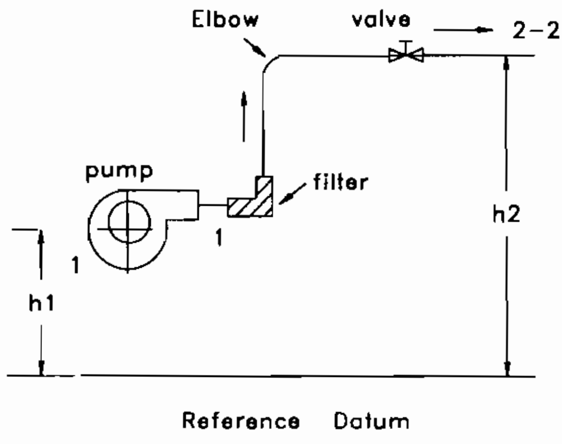
٣- قوانين نيوتن للحركة وهى :

أ- كل جسم يستمر فى حالة سكون او فى حالة حركة منتظمة فى خط مستقيم مالم تؤثر عليه قوة خارجية تغير من حالته.

ب- معدل تغير دفع المادة Momentum يتناسب مباشرة مع القوة المسببه لدفعة وفى نفس اتجاهها.

ج- لكل فعل رد فعل مساو له فى القوة ومعاكس فى الاتجاه.

فاذا افترضنا ان هناك مجموعة هيدروليكيه مكونه من مضخه ومرشح ، وصمام ، وكوع Elbow وماسورة توصيل كما هو مبين بالشكل (٤-١).



شكل (٤-١) رسم تخطيطى للمجموعه الهيدروليكيه

واعتبرنا ان حدود هذه المجموعه هى النقطتين ١ ، ٢ فاذا كان معدل سريان السائل فى هذه الحالة ثابتا ولايتغير نتيجة لتخزين جزء منه فى المجموعه فانه يمكن وصف المجموعه رياضيا كما يأتى :-

$$M = \rho_1 A_1 V_1 = \rho_2 A_2 V_2 = ... = \rho_n A_n V_n \qquad (4-1)$$

حيث ان :

A = مساحة مقطع السريان
V = سرعة السريان
ρ = كثافة السائل
M = معدل كتلة سريان السائل

وتسمى هذه العلاقة بالمعادلة الاستمراريه للكتله Continuity equation

واذا طبقنا على هذه المجموعة قانون ثبوت الطاقة مع اعتبار السائل عند درجة حرارة ثابتة فان طاقة الرفع وطاقة الشغل المضافه من المضخه بعد تنزيل طاقة الاحتكاك الناتجة عن السريان ، ويمكن تمثيلها رياضيا كالآتى مع اعتبار وحدة واحدة من كتلة السائل :

$$h_1 + \frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} + W - F = h_2 + \frac{P_2}{r} + \frac{V_2^2}{2g} \qquad (4-2)$$

حيث ان :

W = الشغل المضاف الى المضخه.
F = طاقة الاحتكاك المفقودة فى المواسير والمرشحات والكيعان والصمامات...

وتسمى هذه العلاقة بمعادلة برنولى Bernoulli Equation

وطاقة الاحتكاك " F " تعتمد على عدة عوامل اهمها :

١- نوع السريان .
٢- حجم وشكل مقطع السريان .
٣- مدى خشونة او نعومة سطح السريان الداخلى .
٤- سرعة السريان.

ويمكن حساب قيمة " F " باستخدام معادلة دارسى Darcy Equation

$$F = f_c \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{V^2}{2g} \qquad (4\text{-}3)$$

حيث ان :

f_c = معامل الاحتكاك (غير مميز)

L = طول مجرى السريان

D = قطر مجرى السريان

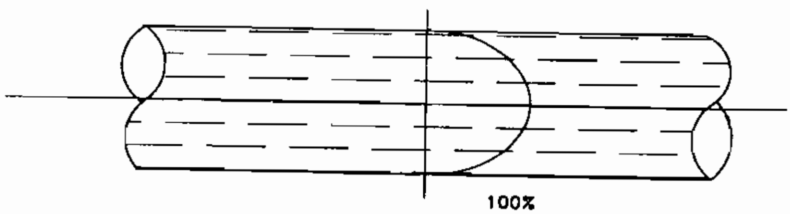
V = سرعة السريان

g = عجلة الجاذبيه الارضيه

يمكن حساب معامل الاحتكاك f_c بمعرفة نوع السريان ودرجة خشونة او نعومة مجرى السريان (جدول ٤-١).

انواع السريان :

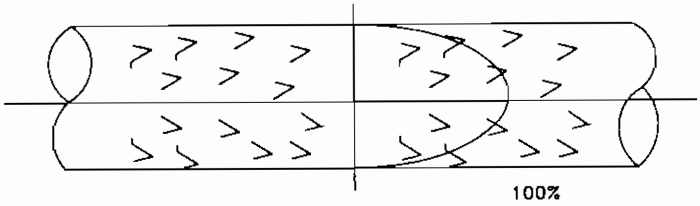
١- السريان الطبقى أو الانسيابى او المتوازى : Streamlined or Laminar Flow



شكل(٤-٢) سريان طبقى متوازى

ويتميز بان المائع يتحرك ببطىء فى شرائح موازيه لبعضها بدون اى تداخل بينها. وتكون كل شريحه من المائع سرعتها ثابته وهذا لايعنى ان كل الشرائح تتحرك بنفس السرعه(شكل ٤-٢).

٢- السريان الدوامى المضطرب : Turbulent or Eddy Flow



شكل (٤-٣) سريان دوامى مضطرب

وفى هذا النوع من السريان يتحرك المائع بسرعات مرتفعه ولايمكن تحديد طبقات متوازيه للمائع لانها تكون متداخله مع بعضها وفى حركة مضطربه ودواميه شكل (٤-٣).

فاذا افترضنا انه يوجد لدينا مائع يتحرك داخل مجرى اسطوانى (ماسورة مثلا) فاننا نلاحظ ان طبقة المائع الملاصقه لجدار الماسورة تكون فى حالة سكون اى سرعتها تساوى صفرا وان سرعة الطبقات الاخرى تزداد الى ان تصل عند المحور الى اعلى قيمة لها . وهذا ينطبق على السريان سواء كان متوازيا او مضطربا .

واذا زادت سرعة السريان المتوازى داخل مجرى السريان فاننا نلاحظ انه توجد مرحلة يبدأ عندها السريان فى الاضطراب وتتداخل طبقات السائل تدريجيا الى ان تصل الى حالة الاضطراب الكامل . وتسمى هذه المرحلة بمرحلة الانتقال Transition Region وتسمى السرعه التى تبدأ عندها هذه المرحلة بالسرعه الحرجه Critical velocity. وقد وجد العالم الانجليزى رينولدز Reynolds ان هذه السرعه تعتمد على اربعة عوامل حددها فى علاقة رياضيه كما يأتى :

$$\text{Reynolds Modulus} = \frac{\rho V D}{\mu} \qquad (4\text{-}4)$$

حيث أن :

V = السرعه المتوسطه للسريان

D = قطر مجرى السريـــــان

ρ = كثافة المائع

μ = لزوجة المائع

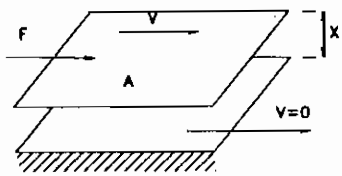
وانه من المهم جدا ملاحظة ان معامل رينولدز غير مميز ويجب مراعاة ذلك عند اختيار الوحدات المتناظره لمكونات هذا المعامل وقد وجد ان قيمة معامل رينولدز اذا كانت اقل من ٢١٠٠ يكون السريان متوازى واذا زادت عن ٤٠٠٠ يكون السريان مضطرب ودوامى .

وفى حالة اذا كان مجرى السريان غير اسطوانى فيستخدم القطر الهيدروليكى فى معامل رينولدز وهو يساوى :

$$\text{Hydraulic Diameter} = \frac{4 \times \text{Cross Sectional Area of Flow Conduit}}{\text{Wetted Perimeter}} \qquad (4\text{-}5)$$

اللزوجة : Viscosity

وهى مقياس لمدى احتكاك طبقات الموائع مع بعضها اى انها تعبر عن مدى مقاومة الموائع لاجهادات حركتها .



شكل (٤-٤) إنزلاق طبقات السائل

فاذا افترضنا انه توجد لدينا طبقتان من مائع ما تفصلهما مسافه X ومساحة سطح كل طبقه A وان الطبقه السفلى فى حالة سكون والعليا تتحرك بسرعه V (اى ان السرعه النسبيه للطبقه العليا عن السفلى هى V) فقد وجد من الدراسات المعمليه انه اذا أثرت قوة F على الطبقه العليا وتسببت فى حركتها بسرعة V فان هذه القوه تتناسب تناسبا مباشرا مع السرعه ومساحة سطح الطبقه وعكسيا مع المسافه بين الطبقتين شكل (٤-٤).

ويمكن التعبير عن ذلك رياضيا كما يلى :

$$F = \frac{\mu V}{X} . A \qquad (4\text{-}6)$$

حيث ان :

F	=	القوة المؤثرة	رطل قوة	أو جم قوة (الداين) أو	نيوتن
V	=	السرعه	قدم/ث	أو سم/ث أو	متر/ث
X	=	المسافه	قدم	أو سم أو	متر
A	=	مساحة سطح الطبقه	قدم مربع أو سم مربع	أو	متر مربع
μ	-	معامل اللزوجه	Coefficient of Viscosity		

وتكون وحدات اللزوجة $\frac{Lb_f.sec.}{ft^2}$ بالوحدات الانجليزية

أو $\frac{gm_f.sec.}{cm^2}$ بالوحدات المتريه او $\frac{N.sec.}{m^2}$ بوحدات النظام الدولى

ويمكن التعبير عن اللزوجة بوحدات الكتله وذلك باستخدام معامل التحويل (g_c) ٣٢ر٢ رطل كتله.قدم/رطل قوة.ث^٢ بالوحدات الانجليزيه او ٩٨٠ جرام كتله.سم/جرام قوه.ث^٢ بالوحدات المتريه .

وعادة مايعبر عنها بوحدات البواز Poise أو السنتيبواز Cp .

$$Poise = \frac{Dyne.s}{cm^2} \quad or \quad \frac{g}{cm.s} \quad or \quad 10\ \frac{kg}{m.s}$$

حساب معامل الاحتكاك :

يمكن حساب معامل الاحتكاك (f_c)فى نظام السريان المتوازى المستقر من المعادله الآتيه :

$$2100 > Re > zero, \quad f_c = \frac{64}{Re} \qquad (4-7)$$

وفى حالة السريان الدوامى المضطرب يمكن حسابه من :

$$Re > 4000, \quad f_c = 0.316\ Re^{-0.25} \qquad (4-8)$$

ومن المتعارف عليه عمليا ان الفقد الناتج عن احتكاك المائع اثناء سريانه فى مجارى السريان ووصلاتها (مواسير – محابس – كيعان..) فانه يمكن التعبير عن الفقد باحدى الطريقتين :

١- كنسبة معينه من الطاقه الحركية اى ان :

$$C_s \times \frac{V^2}{2g}$$

٢- كطول اضافى لطول مجرى السريان يعادل :
٤٠ الى ٦٠ × C_y × قطر مجرى السريان

حيث C_y، C_s نسب معينه يمكن الحصول عليها من جداول خاصه .

جدول (٤-١) يبين القيم المختلفه لمعامل الاحتكاك داخل الوصلات فى المواسير :

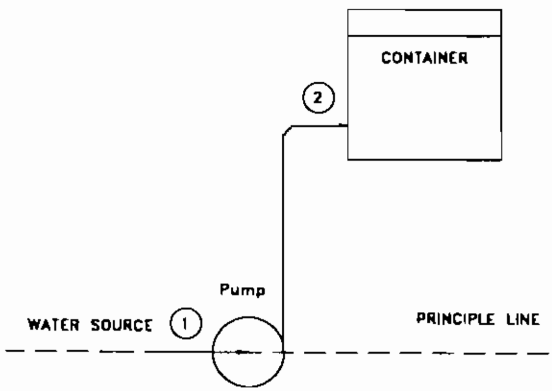
نـــــوع الوصلـــــه	C_y معامل الطول الاضافى	C_s معامل طاقه الحركة
كوع ٤٥°	١٥	٠٫٣
كوع ٩٠° قياس	٣٢	٠٫٧٤
كوع ٩٠° متوسط	٢٦	٠٫٦
كوع ٩٠° طويل	٢٠	٠٫٤٦
كوع ٩٠° مربع	٦٠	١٫٣٠
وصلة حرف Tee (اتجاه واحد)	٦٠	١٫٣٠
(اتجاهيـــن)	٩٠	١٫٩٠
محبس سكينه كامل الفتح	٧	٠٫١٣
محبس كروى كامل الفتح	٣٠٠	٦٫٠٠
محبس زاوية كامل الفتح	١٧٠	٣٫٠٠
D_1/D_2		
تخفيض فجائى ٠٫١		٠٫٣٦٢
٠٫٣		٠٫٣٠٨
٠٫٥		٠٫٢٢١
فى قطر ماسورة ٠٫٧		٠٫١٠٥
٠٫٩		٠٫١٠٥

المصدر : Handerson and Perry (1976)

مثال (١):

خزان للمياه يوجد على إرتفاع ٣ متر من مصدر للمياه اذا كانت ماسورة توصيل المياه إلى الخزان قطرها الداخلى ١٥سم ومعدل سريان المياه ٢٠٠٠ لتر فى الدقيقه . إحسب القدرة بالحصان اللازمه لرفع هذه الكميه من المياه مع إهمال أى فقد فى الطاقه .

الحـــل



$$2000 \text{ Lit/min} = \frac{2000 \times 1000}{(100)^3} = 2 \text{ m}^3/\text{min}$$

$$\text{Cross - Sectional area} = \frac{\pi}{4} D^2$$

$$= \frac{\pi}{4} \left(\frac{15}{100}\right)^2 = 0.0177 \text{ m}^2$$

سرعة السائل عند مخرج الماسورة (V)

$$V = \frac{2}{0.0177} = 113 \text{ m/min}$$

وبتطبيق معادلة برنولى واهمال فقد الاحتكاك وتغيير الاتجاه والفقد فى أى وصلات على الخط مع أخذ مصدر المياه كخط أساس .

$$\therefore \quad W = h + \frac{V^2}{2g}$$

$$W = 3 + \frac{(113)^2}{2 \times 60 \times 60 \times 9.81}$$

$$= 3 + 0.18$$

$$= 3.18 \quad kgm/kg.$$

∴ الشغل الاجمالى = المعدل الوزنى للسريان × الشغل لكل وحدة وزنيه

$$\rho \; water = 1000 \quad kg/m^3$$

$$\therefore W_T = (1000)\ (2)\ (3.18)$$

$$= 6360 \quad kg.m/min.$$

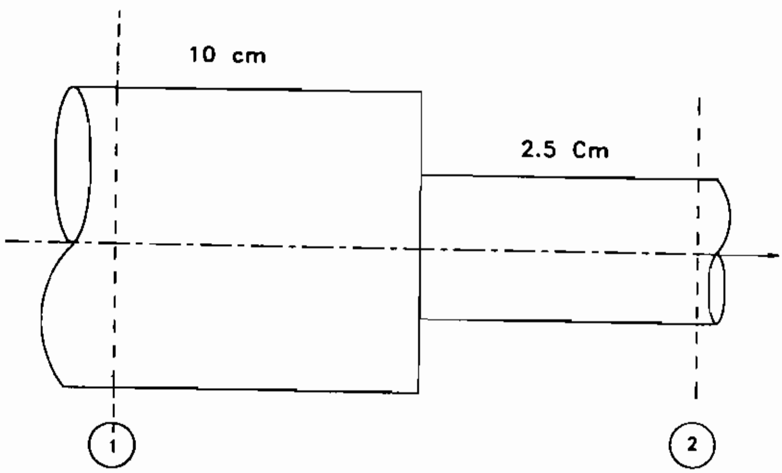
$$= \frac{6360}{4500}$$

$$W_T = 1.41 \quad HP$$

مثال (٢) :

تسرى المياه داخل ماسورة قطرها الداخلى ١٠سم إلى ماسورة قطرها الداخلى ٥ر٢سم وذلك بمعدل ٨٠٠ لتر/دقيقه اذا كان الضغط فوق سطح الماء فى الماسورة ذات القطر الكبير هو ٣ بار ، إحسب مقدار الضغط فى الماسورة ذات القطر الصغير وذلك بإهمال الفقد فى السريان نتيجة الاحتكاك وتغيير مقطع السريان .

الحـــل



مساحة مقطع السريان (A_1)عند النقطه (1)

$$A_1 = \frac{\pi}{4} D_1^2$$

$$A_1 = \frac{\pi}{4} \left(\frac{10}{100}\right)^2$$

$$A_1 = 0.00785 \quad m^2$$

سرعة السريان (V_1)عند النقطة (1)

$$V_1 = \frac{800 \times 1000}{60 \times (100)^3 \times 0.00785}$$

$$V_1 = 1.7 \quad m/sec.$$

ومن معادلة الاستمراريه

$$A_1 V_1 = A_2 V_2$$

$$\therefore V_2 = \frac{A_1}{A_2} . V_1$$

$$V_2 = \frac{\pi/4 D_1^2}{\pi/4 D_2^2} . V_1$$

$$= \left(\frac{10}{2.5}\right)^2 \quad V_1$$

$$= 16 \times 1.7$$

$$\therefore V_2 = 27.2 \quad m/sec.$$

وباعتبار أن محور الماسورة هو خط الأساس نجد من معادلة برنولى أن :

$$\frac{P_1}{\rho} + \frac{V_1^2}{2g} = \frac{P_2}{\rho} + \frac{V_2^2}{2g}$$

$$(100)^2 \times \frac{3}{1000} + \frac{(1.7)^2}{2 \times 9.81} = \frac{(100)^2 P_2}{1000} + \frac{(27.2)^2}{2 \times 9.81}$$

$$\therefore 10P_2 = 30 + 0.147 - 37.7$$

$$= -7.56$$

$$\therefore P_2 = -0.756 \quad bar.$$

ومعنى الاشاره السالبه أن الضغط فى ماسورة الخروج أقل من الضغط الجوى العادى أي أن هناك تفريغ (ضغط سالب).

الباب الخامس

سريان الموائع اللانيوتونيه

Non-Newtonian Fluid Flow

تكلمنا فى الفصل السابق عن سريان الموائع النيوتونيه بمعنى أنها يتحكم فى تدفقها أو سريانها قانون نيوتن ، وعامة سلوك أى مادة يتبع احدى الحالات الثلاثه التاليه : المرونه Elasticity- اللدونه Plasticity - اللزوجه Viscosity.

ففى حالة السلوك المرن المثالى يكون الإجهاد (τ) الواقع على جسم ما يتناسب تناسبا طرديا مع الانفعال (γ)والذى يحكمه قانون هوك Hook's Law .

$$\tau = E\,\gamma \qquad (5\text{-}1)$$

حيث E هو معامل المرونه أو معامل يانج Young Modulus واذا أثرت قوة ما على مادة صلبه لاينتج عنها حركة حتى نصل إلى إجهاد الخضوع Yield Stress حيث تكون الحركه لاحدود لها تحت تأثير هذه القوه فيكون ذلك ممثلا للدونه .

ومعظم المنتجات الغذائيه تسلك سلوكا مختلطا بين المواد المرنـــه واللزجه وتختلف في ذلك عن سلوك المواد (الموائع) النيوتونيه بمعنى أن العلاقه التى تحكم تناسب إجهاد القص مع معدل القص علاقه غير خطيه تعتمد على كل من الزمن ومعدل التناقص فى سرعة الطبقات على بعضها .

وفى محاولات عديده وجد أن أنسب علاقه لتمثيل السلوك الغير نيوتونى رياضيا هو استخدام مايسمى قانون الأس Power Law

$$\tau = K\,\gamma^{n} \qquad (5\text{-}2)$$

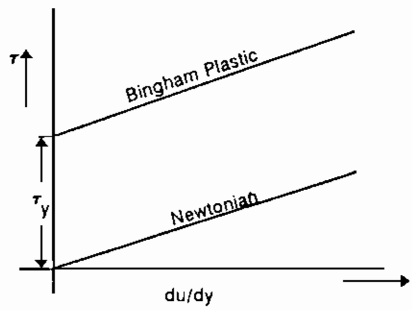
حيث :

K = معامل القوام وهومايعادل معامل اللزوجه فى حالة الموائع النيوتونيه.

n = الأس ويساوى الواحد الصحيح فى حالة الموائع النيوتونيه.

ويمكن تقسيم الموائع غير النيوتونيه إلى مايأتى :-

١- موائع بنجهام بلاستيك Bingham Plastic Fluids

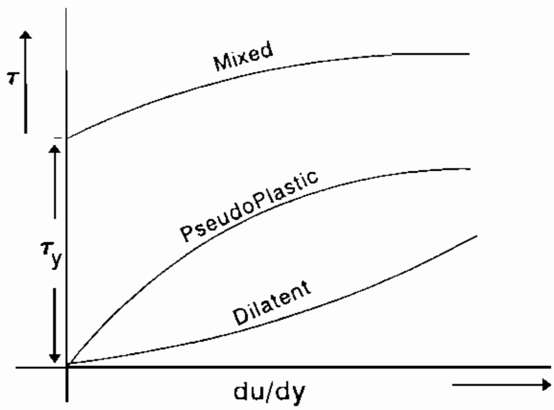


شكل (٥-١) العلاقه بين إجهاد القص ومعدل القص

وهى مواد لها خاصية عدم البدء فى السريان أو التدفق قبل الوصول إلى إجهاد خضوع Yield Stress وبعدها يكون السريان لزج عادى (شكل ٥-١).

$$\tau = K\left(-\frac{du}{dy}\right) + \tau_y \qquad (5\text{-}3)$$

٢- موائع شبيهة البلاستيك Pseudo Plastic Fluids.



شكل (٥-٢) الموائع المختلفه

وهى تمثل أغلبية السوائل الغير نيوتونيه حيث يكون هناك تناقص فى اجهاد القص كلما زاد معدل القص وبذلك تكون قيمة n أقل من الواحد الصحيح ويكون منحنى السريان مقعرا إلى أسفل (شكل ٥-٢) .

٣- موائع ديلاتينيه Dilatent Fluids

وفيها يكون هناك زيادة فى اجهاد القص كلما زاد معدل القص وتكون قيمة n أكبر من الواحد الصحيح وبذلك يكون منحنى السريان مقعراً إلى أعلى (شكل ٥-٢).

٤- موائع مختلطه Mixed Fluids

وفيها يكون هناك اجهاد خضوع قبل السريان الشبه بلاستيكى كما هو مبين فى الشكل (٥-٢)

ويمكن تمثيلها بالمعادله الآتيه :

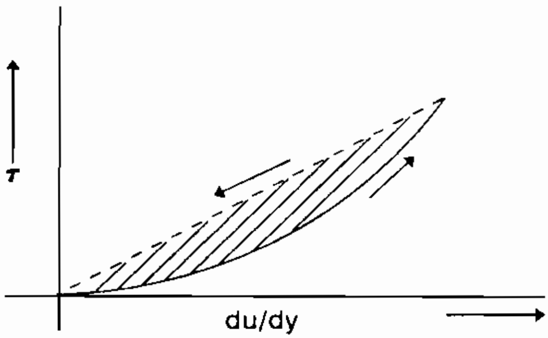
$$\tau = K \left(\frac{du}{dy}\right)^n + \tau_y \qquad (5\text{-}4)$$

وهى الحاله العامه للموائع المختلطه .

وتكون n < ١ ، τ_y = صفر فى حالة المواد شبه بلاستيكيه

وتكون n > ١ ، τ_y = صفر فى حالة المواد الديلاتينيه

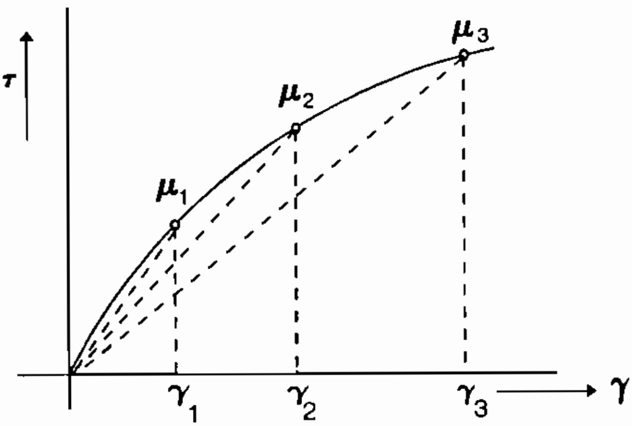
وتنقسم المواد الديلاتينيه Dilatent إلى نوعين طبقا لتغير إجهاد القص بالنسبه للزمن مع معدل القص . فإذا مازاد إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها موائع متزايدة القوام Rheopectic ، واذا مانقص إجهاد القص مع الزمن فإنه يطلق عليها مواد متناقصة القوام Thixotropic وينتج عن ذلك قصور فى طاقة الاحتكاك بين الطبقات Hystresis كما هو مبين فى الشكل (٥-٣).



شكل (٥-٣) طاقة الاحتكاك بين طبقات المائع

وتتأثر كل من اللزوجه والقوام إلى حد كبير بدرجة الحراره ويعتبر استخدام معادلة ارهينيوس » Arrhenius Equation على نطاق واسع معبرا عن هذه العلاقه حيث يتناسب معامل اللزوجه أو معامل القوام تناسبا عكسيا مع درجة الحرارة المطلقه للمائع .

وفى كثير من تطبيقات صناعة الاغذيه نجد ان هناك محاولات لقياس اللزوجه النيوتونيه دون الحاجه الى معرفة خصائص انسياب السائل وينتج عن ذلك قياس اللزوجه الظاهريه Apparent Viscosity وهى التى تعبر عن اللزوجه لسائل نيوتونى له مقاومة للسريان عند قص محدد Shear Rate (شكل ٥-٤) وفى أغلب حالات الموائع الشبه بلاستيكيه تتناقص اللزوجه الظاهريه عند زيادة معدل القص.



شكل (٥-٤) اللزوجه الظاهريه للمائع

μ_A = Apparent Viscosity

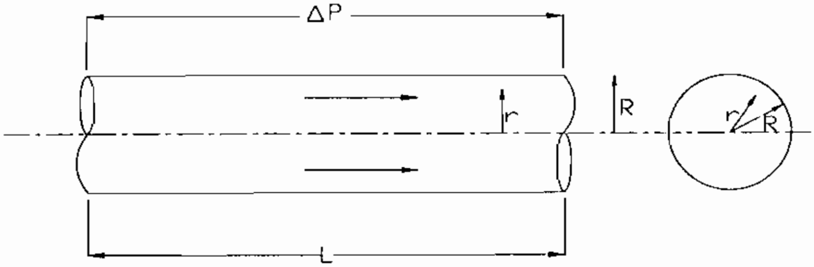
$\mu_A = (\frac{\tau}{\gamma})$ at a given shear rate

أجهزة قياس اللزوجه أو القوام :

لقياس اللزوجه أو القوام لأى موائع غذائيه يمكن إستخدام أجهزة خاصه تسمى فيسكومترات Viscometers أو ريومترات Rheometers. ويوجد عادة جهازين أو طريقتين رئيسيتين : جهاز يعتمد على سريان المائع داخل الأنابيب ويسمى Tube Viscometer، وجهاز يعتمد على دوران المائع حول اسطوانه ومن خلال فراغ ضيق ويسمى Rotational or Coaxial Viscometer.

النوع الأول :

ريومترات الأنبوبه الشعريه Capillary Tube Rheometers



شكل (٥-٥) ريومترات الأنبوبه الشعريه

بصفه عامه تتضمن ريومترات الأنبوبه الشعريه عدداً من أجهزة القياس التى تدفع السائل خلال انبوبه معلوم قياساتها الهندسيه شكل (٥-٥). نستطيع الحصول على علاقه بين معدل القص واجهاد القص وذلك بقياس تدرج الضغط ومعدل السريان الحجمي للمائع خلال الأنبوبه الشعريه .

ويمكن الحصول على العلاقه بين معدل القص واجهاد القص اللازمه لدفع المائع خلال الأنبوبه الشعريه عن طريق عمل ميزان للقوى على المقطع العرضى للأنبوبه الشعريه .

القوه المسببه للسريان هى فرق الضغط بين طرفى الأنبوبه ΔP

$$\tau = \frac{\Delta P.\ \pi\ r^2}{2\pi\ r L} \qquad (5.5)$$

حيث $\pi\ r^2$ = المساحه المقطعيه

$2\pi\ r L$ = المساحه السطحيه للشريحه

$$\therefore \tau = \frac{\Delta P. r}{2L}$$

$$\tau = K\gamma^{n}$$

$$= -K\left(\frac{du}{dr}\right)^{n}$$

$$\frac{\Delta P. r}{2L} = -K\left(\frac{du}{dr}\right)^{n}$$

$$-\int_u^o du = \left(\frac{\Delta P.}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} . \int_o^r r^{\frac{1}{n}} dr$$

$$\int_o^u du = \left(\frac{\Delta P.}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{\frac{n+1}{n}}}{\frac{n+1}{n}}\right]_o^R$$

$$\therefore u = \left(\frac{\Delta P.}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \frac{R^{\frac{1+n}{n}}}{\left(\frac{1+n}{n}\right)} \qquad (5\text{-}6)$$

ومعدل السريان الحجمى Q

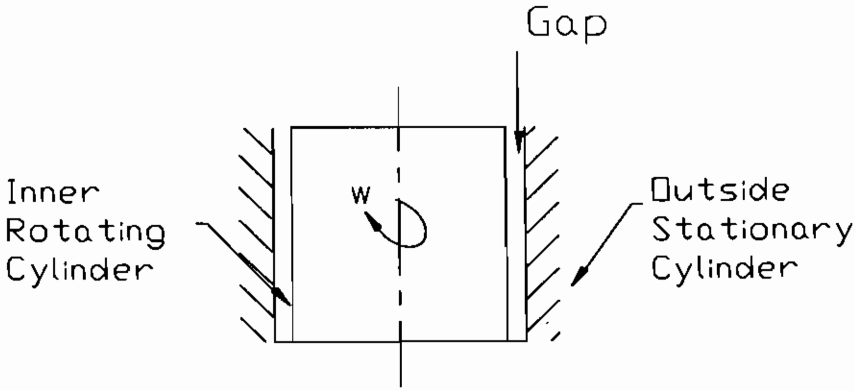
$$Q = \pi R^2 . u$$

$$Q = \pi \left(\frac{n}{n+1}\right) R^{\frac{3n+1}{n}} \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}} \tag{5-7}$$

ويمكن حساب كل من معامل القوام K والأس n وذلك برسم معدل السريان الحجمى Q مع قيمة $(\frac{\Delta P}{2L})$ على ورق بيانى لوغاريتمى فيكون ميل الخط المستقيم الناتج هو قيمة الأس n ومقدار الجزء المقطوع مع المحور الرأسى يمكن حساب قيمة معامل القوام K منه .

النوع الثانى :

الريومترات الدورانيه المتمركزه Rotational Coaxial Rheometers



شكل (٥-٦) ريومترات الاسطوانه الدورانيه

تستخدم الريومترات الدورانيه شكل (٥-٦) لقياس إجهاد القص حيث تتعرض العينه فيها إلى معدل قص منتظم ، وتتم عملية القياس على أساس قياس عزم الدوران اللازم لادارة الأسطوانه الداخليه عند عدد معلوم من الدوران لكل وحدة زمن. ويكون:

$$\Omega = (2\pi \ rL) . \tau . r \tag{5-8}$$

$$\gamma = -r \frac{d\omega}{dr} \tag{5-9}$$

حيث Ω = عزم الدوران = القوه × ذراع العزم

ω = السرعه الزاويه

وحيث أن

$$\tau = K\left(-r\frac{d\omega}{dr}\right)^n \qquad (5-10)$$

$$\therefore \frac{\Omega}{2\pi L.r^2} = K\left(-r\frac{d\omega}{dr}\right)^n$$

$$\therefore -r\frac{d\omega}{dr} = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} . \frac{1}{r^{2/n}}$$

$$-d\omega = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} . \frac{dr}{r^{\frac{2}{n}+1}}$$

$$-\int_o^{\omega i} d\omega = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} \int_{Ro}^{Ri} \frac{dr}{r^{\frac{2+n}{n}}}$$

$$\therefore -\omega_i = \left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left[\frac{r^{-\frac{2+n}{n}+1}}{-\frac{2+n}{n}+1}\right]_{Ro}^{Ri}$$

$$-\omega_i = -\frac{n}{2}\left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{R_i^{2/n}} - \frac{1}{R_o^{2/n}}\right)$$

$$\therefore \omega_i = \left(\frac{n}{2}\right)\left(\frac{\Omega}{2\pi KL}\right)^{\frac{1}{n}} \left(\frac{1}{R_i^{2/n}} - \frac{1}{R_o^{2/n}}\right) \qquad (5-11)$$

ومن هذه المعادله (رقم ٥-١١) يمكننا ايجاد قيمة كل من معامل القوام K وقيمة الأس n وذلك عند رسم العلاقه التجريبيه لقيم مختلفه للوغاريتم السرعه الزاويه مع قيم لوغاريتم عزم الدوران على إحداثيات بيانيه .

ويمكننا الحصول على معامل اللزوجه للسوائل النيوتونيه من هذه المعادله بوضع قيمة n = 1 وبذلك .

$$\mu = \frac{\Omega}{4\pi\ \omega_i L} \cdot \left[\frac{1}{R_i^2} - \frac{1}{R_o^2}\right] \qquad (5\text{-}12)$$

وبمقارنة المعادلتين الأخيرتين يمكننا الحصول على صيغه للعلاقه بين اللزوجه الظاهريه وكل من معامل القوام K والأس n. فإذا كانت السرعه الدورانيه للاسطوانه الداخليه لجهاز قياس اللزوجه هى N.

$$\therefore\ \omega_i = 2\pi N$$

وبذلك تكون العلاقه المطلوبه هى :

$$\mu_A = \left(\frac{1}{n}\right)^n . (4\pi N)^{n-1} . K \qquad (5\text{-}13)$$

مثال (١) :

تم الحصول على النتائج التجريبيه التاليه من جهاز قياس لزوجة أنبوبى Tube Viscometer قطره ٢٦٧. . سم وطوله ٩١. . متر وكان المائع المستخدم هو صلصة التفاح Apple Sauce .

ΔP Pascal x 10^5	Q $m^3/sec.10^{-4}$
١.٢	٩١. .
١.٤٥	٢.٥
٢.٥٦	٢.١
١.٩٩	٣.٢
٢.١٣	٥.٢
٢.٤١	٨.٥
٢.٧	١٢.٤٩

إحسب كل من معامل القوام K وقيمة الأس n

الحـــل

معدل السريان الحجمى فى الأنبوبه الشعريه يمكن الحصول عليه من المعادله :

$$Q = \pi \left(\frac{n}{n+1}\right) R^{\frac{3n+1}{n}} \cdot \left(\frac{\Delta P}{2KL}\right)^{\frac{1}{n}}$$

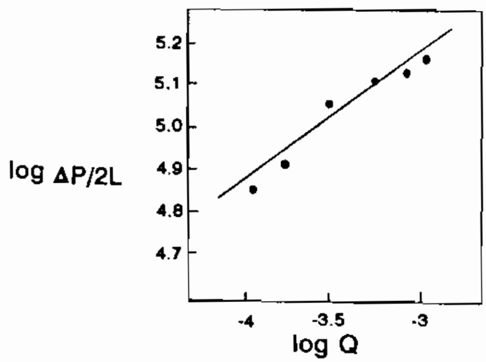
ويمكن اعادة الصياغه بدلالة الفقد فى الضغط كالآتى :

$$\frac{\Delta P}{2L} = \left(\frac{K}{\pi^{n}}\right) \left(\frac{n+1}{n}\right)^{n} \cdot \frac{1}{R^{3n+1}} \cdot Q^{n}$$

$$\log\left(\frac{\Delta P}{2L}\right) = \log K - n \log \pi + n \log \frac{n+1}{n} - (3n+1)\log R + n \log Q$$

وبتمثيل هذه المعادله بيانياً بحيث يكون المحور الرأسى يمثل $\log \frac{\Delta P}{2L}$ والمحور الأفقى يمثل log Q فيكون ميل الخط المستقيم هو قيمة الأس n.

$\frac{\Delta P}{2L} \times 10^{5}$	$\log \frac{\Delta P}{2L}$	log Q
٠.٧١٥	٤.٨٥	٤.٠٤-
٠.٧٩٥	٤.٩٠	٣.٨٢-
٠.٨٥٥	٤.٩٣	٣.٦٨-
١.٠٩٥	٥.٠٤	٣.٥٠-
١.١٧	٥.٠٧	٣.٢٩-
١.٣٣	٥.١٢	٣.٠٧-
١.٤٩	٥.١٧	٢.٩٠-



ومن الرسم البيانى يكون الميل:

$$n = 0.28$$

وبالتعويض فى المعادله يمكن حساب قيمة K عند أى نقطة من نقاط الخط المستقيم

$$K = 4.074 \quad Pa.\,s^{n}$$

مثال (٢)

تم الحصول على القياسات التاليه للزوجة الظاهريه لمركز المولاس عند درجة حرارة ٢٧٤ كلفن مستخدمين ريومتر أحادى الأسطوانه المتمركزه التى طولها ١١٤٣ . متر وقطرها ١٥٩ . متر وذلك عند سرعات دورانيه مختلفه. إحسب كل من قيمة معامل القوام K وقيمة الأس n .

N (r p m)	μ_A (Pa.s)
٢.٥	١٦.٦
٥.٠	١٦.٠
١٠.٠	١٥.٥
٢٠.٠	١٥.٤
٥٠.٠	١٤.٦
١٠٠.٠	١٤.٢

الحـــل

من المعادله التى تربط اللزوجه الظاهريه وسرعة دوران اسطوانه جهاز الريومتر نجد أن :

$$\mu_A = \left(\frac{1}{n}\right)^{n} . \; (4\pi N)^{n-1} . K$$

$$\therefore \log \mu_A = n \log \left(\frac{1}{n}\right) + \log K + (n-1) \log (4\pi N)$$

وبرسم قيم كل من $\log \mu_A$ ، $\log (4\pi N)$ نجد أن .

$\log (4\pi N)$	$\log \mu_A$
-٠.٢٨١	١.٢٢٠
٠.٠٢٠	١.٢٠٤
٠.٣٢١	١.١٩٠
٠.٦٢٢	١.١٨٨
١.٠٢٠	١.١٦٤
١.٣٢١	١.١٥٢

فيكون ميل المنحنى $n-1 = -0.0417$

$$\therefore n = 0.9583$$

ويمكن التعويض فى المعادله السابقه لأى قيمة $\log \mu_A$ والمناظره لها قيمة $\log (4\pi\ N)$ ومنها يمكن حساب قيمة معامل القوام K

$$K = 15.5 \quad Pa.\ s^n$$

الاحتكاك Friction

إنه من الأهميه بمكان دراسة تأثير نوع السريان على معاملات الاحتكاك بين طبقات المائع وبعضها وبينها وبين الوعاء المحتوى عليها أثناء تطور الأنواع المختلفه من نظم السريان (طبقى - مرحلى - دوامى). وحيث أن معظم المواد الغذائيه المصنعه تسلك سلوك غير نيوتونى وتتأثر كثيرا بدرجة الحراره أثناء معامله هذه المواد حراريا ، وبالتالى يتطلب الأمر تطوير صيغ رياضيه للموائع الغير نيوتونيه لامكان استخدامها لوصف سلوك الموائع أثناء سريانها وبالأخص داخل الأنابيب أو المواسير الأسطوانيه .

ويتعين علينا استخدام رقم رينولدز آخر مختلف عن الموائع النيوتونيه ويسمى رقم رينولدز العام Generalized Reynolds Number (GRe) حيث :

$$GRe = \frac{\rho u^{2-n} D^n}{2^{n-3} . K \left[\frac{3n+1}{n}\right]^n} \qquad (5\text{-}14)$$

ومن الواضح أن رقم رينولدز العام سيتغير بتغير نفس المعاملات كما هو الحال بالنسبه لرقم رينولدز العادى ولكن يختلفان فى أن القيمه ستتغير مع تغير قيمة الأس n (دليل سلوك السريان) ويتلاحظ أن رقم رينولدز العام يساوى رقم رينولدز العادى عندما تكون قيمة $n = 1$ وبالتالى تتحول K الى μ .

وفى حالة السريان الانسيابى أو الطبقى يكون

GRe < 2100 Laminar Flow

$$f = \text{friction factor} = \frac{64}{GRe}$$

وفى حالة السريان الدوامي المضطرب

GRe < 2100 Laminar Flow

$$f = 0.316 / GRe^{0.25}$$

ومن العوامل الأخرى الهامه فى عملية وصف سريان موائع الأغذيه هو طاقة الحركه ، فاذا طبقنا قانون الأس بالنسبه لمائع يسرى داخل أنبوب اسطوانى فتكون طاقة الحركه كما يأتى :

$$K.E. = \frac{u^2}{2\,ag} = \text{Constant} = a$$

where

$$a = \frac{(4n+2)(5n+3)}{3(3n+1)^2}$$

ويلاحظ أن قيمته تساوى الواحد الصحيح عندما تكون $n = 1$ أى فى حالة سائل نيوتونى.

مثال (٣):

إحسب قيمة رقم رينولدز لتحديد نوع السريان لمركز المشمش ذو الخصائص الآتيه :

$n = 0.3$ $\quad$ $K = 20 \ Pa.s^n$

اذا كان سريان مركز المشمش فى أنبوب قطره ٢.٥٤سم وسرعة السريان المتوسطه تساوى ٠.٠٦ متر/ثانيه. ماذا تكون قيمة رقم رينولدز فى حالة سريان مياه نقيه فى الأنبوب ؟

ρ apricot = 1040 kg/m^3

ρ Water = 1000 kg/m^3

μ water = 1488 X 10^{-3} Pa.sec.

الحـــل

$$GRe = \frac{\rho\, u^{2-n} D^n}{2^{n-3}.\, K\left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$GRe = \frac{(1040)(0.6)^{1.7}\left(\frac{2.54}{100}\right)^{0.3}}{2^{-2.7}.(20).\left(\frac{0.9+1}{0.3}\right)^{0.3}}$$

$$= 27.1$$

وعلى هذا الأساس يكون السريان طبقى متوازى

وفى حالة استخدام مياه نقيه

$$Re = \frac{\rho\, u\, D}{\mu}$$

$$= \frac{(1000)(0.6)\left(\frac{2.54}{100}\right)}{1488 \times 10^{-3}}$$

$$= 10.24$$

وكذلك يكون السريان طبقى متوازى .

مثال (٤)

يتم ضخ صلصة التفاح Apple Sauce خلال ماسورة قطرها ٥سم بسرعة متوسطه قدرها ٢ متر/ثانيه ودرجة حرارة ٢٤°م أوجد نوع السريان واحسب قيمة معامل الاحتكاك اذا كان :

$$n = 0.408 \qquad k = 0.66 \quad Pa.s^n$$

$$\rho = 1100 \qquad kg/m^3$$

الحـــل

$$GRe = \frac{\rho u^{2-n} D^{n}}{2^{n-3}.K.\left(\frac{3n+1}{n}\right)^{n}}$$

$$GRe = \frac{(1100)\,(3)^{\,1.592}\,(0.05)^{\,0.408}}{2^{\,-2.592}\,.\,(0.66).\,\left(\frac{1.224+1}{0.408}\right)^{0.408}}$$

$$= 8519$$

وعلي ذلك يكون السريان دوامي مضطرب

ولحساب قيمة معامل الاحتكاك نستخدم المعادله :

$$f = \frac{0.316}{GRe^{\,0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{(8519)^{\,0.25}} = \frac{0.316}{9.607}$$

$$f = 0.033$$

مثال (٥) :

يتم ضخ عصير الطماطم بمعدل سريان قدرة ٥ جالون/دقيقه(القدم المكعب = ٧.٤٨ جالون) في ماسورة قطرها واحد بوصه ، فإذا كانت كثافه عصير الطماطم = ١.١٣ جم/سم^{٣} ومعامل القوام K = ١٢٥ داين.ث/سم^{٢} وقيمة الأس اللانيوتونى ٠.٤٥ . إحسب الفرق فى ضغط العصير لمتر طولى من الماسوره .

الحل :

$$Dyne = \frac{gm.cm}{sec^{\,2}}$$

$$K = 125\,\frac{gm.cm\ .scc.}{sec^{\,2}.\,cm^{\,2}}$$

$$K = 125\ gm/sec.\,cm. \quad (Poise)$$

$$\&\ \ n = 0.45$$

$$D = 1\,'' = 2.54\ cm$$

$$\text{Volumetric flow rate} = \frac{5}{7.48} = 0.668 \quad ft^3/min$$

$$\pi r^2 u = 0.668$$

$$\therefore \quad u = \frac{0.668}{\pi (0.042)^2} = 122.54 \quad ft/min$$

$$u = \frac{122.54 \times 100}{60 \times 3.28} = 62.27 \ cm/sec.$$

$$GRe = \frac{8.D^n . u^{2-n} \rho}{2^n . K. (\frac{3n+1}{n})^n}$$

$$\therefore GRe = \frac{8. (2.54)^{0.45} . (62.27)^{2-0.45} . 1.13}{2^{0.45} . 125. (\frac{3 \times 0.45 + 1}{0.45})^{0.45}}$$

$$GRe = 23.1$$

$\therefore$ Flow is Laminar

$$\therefore f = \frac{64}{N_{G\,Re}} = \frac{64}{23.1} = 2.77$$

$$\therefore \quad F = f. \frac{L}{D} . \frac{u^2}{2ag}$$

$$a = \frac{(4n + 2) (5n + 3)}{3 (3n + 1)^2}$$

$$= \frac{(4 \times 0.45 + 2) (5 \times 0.45 + 3)}{3 (3 \times 0.45 + 1)^2}$$

$$= \frac{(3.8) (5.25)}{3(2.35)^2} = 1.2$$

$$F = 2.77 \times \frac{100}{2.54} \times \frac{(62.27)^2}{2 \times 981 \times 1.2}$$

$$F = 179.6 \ cms = 1.796 \ m$$

$$\therefore \Delta P = F.\rho$$

$$= 1.796 \times 1130$$

$$\Delta P = 2029.6 \quad kg./m^2$$

$$\text{or } \Delta P = 2029.6 \times 9.81 \quad \frac{\text{Newton}}{m^2} \quad \text{(Pascal)}$$

$$= 19910$$

$$\Delta P = 0.199 \times 10^5 \approx 0.2 \times 10^5 \quad \text{Pascal}$$

مثال (٦) :

يتم تسخين عصير طماطم في مبادل حراري ذو مواسير عددها عشرون ماسوره وطول المبادل ٧ متر وقطر كل ماسوره $\frac{٣}{٤}$ بوصه . فإذا كان معدل السريان الحجمي ٤٠ لتر/دقيقه إحسب مقدار الفقد في الضغط خلال المبادل الحراري اذا علمت أن كثافة عصير الطماطم = ١.١٢ كجم/متر مكعب ويعتبر العصير سائل لانيوتوني

مقدار معامل القوام ٧.١٢ × ١٠^-٧ $\frac{\text{داين} \times \text{ثانيه}}{\text{سم}^٢}$ ومقدار الأس ٠.٤٨ .

الحـــل

Every pipe will have a flow rate equal to 2 lit/min.

$$u = \frac{2 \times 1000}{\pi \times \left(\frac{0.75 \times 2.54}{2}\right)^2 \times 60} = 11.7 \text{ cm/sec.}$$

$$D = \frac{3}{4}'' = \frac{3}{4} \times 2.54$$

$$\therefore D = 1.905 \text{ cm}$$

$$GRe = \frac{8 . D^n . u^{2-n} . \rho}{2^n K . \left(\frac{3n+1}{n}\right)^n}$$

$$= \frac{8 . (1.905)^{0.48} . (11.7)^{2-0.48} . (1.013)}{2^{0.48} . (7.13 \times 10^{-7}) . \left(\frac{3 \times 0.48 + 1}{0.48}\right)^{0.48}}$$

$$= \frac{(8)(1.363)(42)(1.013)(10^7)}{(1.395)(7.13)(2.18)}$$

$$\therefore GRe = 21.4 \times 10^7$$

∴ Flow is turbulent

وعلى هذا الاساس تطبق المعادله

$$f = \frac{0.316}{GRe}$$

$$= \frac{0.316}{(21.4 \times 10^7)^{0.25}}$$

$$f = \frac{0.316}{121} = 2.61 \times 10^{-3}$$

$$\therefore F = f \cdot \frac{L}{D} \cdot \frac{u^2}{2g}$$

$$= (2.61 \times 10^{-3}) \cdot \left(\frac{700 \times 20}{1.905}\right) \cdot \frac{(11.7)^2}{(2 \times 981)}$$

$$F = 1.108 \text{ cm}$$

$$\Delta P = F.\rho$$
$$= 1.108 \times 1.013$$
$$= 1.12 \text{ gm/cm}^2$$
$$= \frac{1.12 \times (100)^2}{(1000)} = 11.2 \text{ kg/m}^2$$

or $\Delta P = 11.2 \times 9.81$

$$\Delta P = 110 \quad \frac{\text{Newton}}{m^2} \text{ or Pascal}$$

الباب السادس

المراوح والمضخات

Fans and Pumps

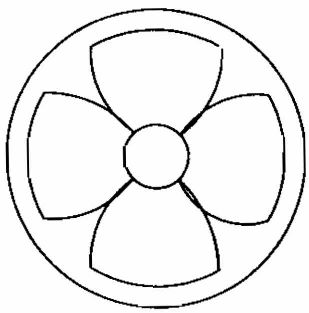
أولا : المراوح : Fans

تستخد لمراوح فى كثير من عمليات تصنيع المنتجات الغذائيه مثل التسخين، التجفيف ، التبريد ، الحفظ فى الثلاجات التجاريــه ، التهويــه ، الشفط (نقل المواد المحببه والمساحيق) كما سنذكر بالتفصيل فيما بعد . والفرق الوحيد بين المراوح والضواغط الدورانيه للغازات هو ان المراوح تعمل عند ضغوط منخفضه (اقل من واحد رطل على البوصه المربعه) وينتج عن ذلك ان الغاز لايضغط كلية ولكن بطريقة جزئيه تتسبب فى تحريكه من جهة الى اخرى . وبذلك يكون حجم الغاز قبل و بعد المروحه ثابت تقريبا بخلاف الحاله فى الضواغط الدورانيه فحجم الغازات يقل كثيرا بعد ضغطها .

وتنقسم المراوح الى مايأتى :

أولا : النوع العمودي: Axial Flow or Propeller Fans

وفيه يكون مرور الغاز مواز للمحور (عمود الدوران) ويمتاز هذا النوع بأنه يعمل عند ضغط مرتفع وذو كفاءة عاليه . وتستخدم هذه المراوح فى عمليات التهويه وشفط الأتربه من عنابر التصنيع وفى العمليات الصناعيه التى تستلزم تقليب الغازات مع المواد المصنعه (شكل ٦-١) .

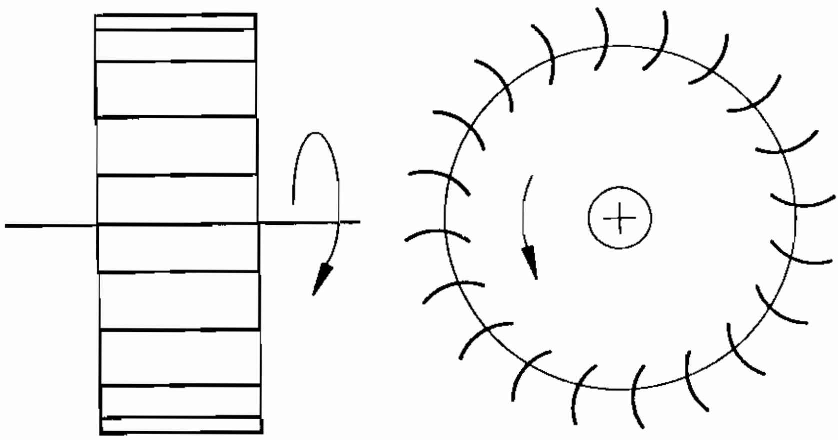


شكل (٦-١) قطاع فى مروحه عموديه

ثانيا : النوع القطرى او الطاردة المركزيه :
Radial or Centrifugal Flow Fan

وفيه تستخدم القوه الطارده المركزيه فى دفع الغازات . وتمتاز هذه المراوح بانها تدفع كميات كبيرة من الغازات عند ضغوط منخفضة . وهى ذات تصميمات متعددة اهمها :

١- المراوح ذات الريش المنحنية الى الامام:
Forward Curved Blade Fans

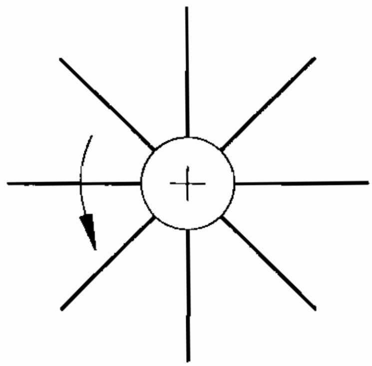


Forward Curved Blade Impeller

شكل (٦-٢) قطاع فى مروحه ذات الريش المنحنيه إلى الأمام

ويتكون قلب او قرص المروحة Rotor or Impeller من عدد كثير من الريش (حوالى ٦٠ ريشه) ذات سمك صغير وتكون عرضيه فى الاتجاه الموازى لعمود الحركة ومنحنيه الى الامام فى نفس اتجاه الدوران شكل (٦-٢). وتعمل المروحه على سرعات بطيئة وتستخدم فى دفع الغازات النظيفه الخالية من الأتربة .

٢- المراوح ذات الريش المستقيمة : Straight Blade Fans

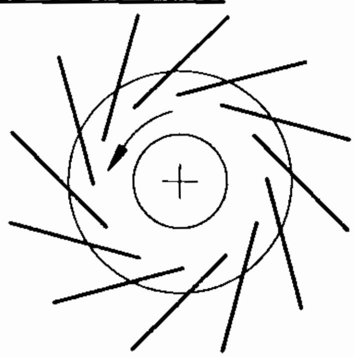


Straight Blade Impeller

شكل (٦-٣) قطاع فى مروحه ذات ريش مستقيمه

وهذا النوع له قرص يتكون من عدد قليل من الريش (حوالى ٦ الى ٢٠ ريشه على الاكثر) وطول الريشة يكون عادة حوالى ضعف او ثلاث مرات عرضها شكل (٦-٣). وتعمل المروحة على سرعات متوسطة ويمكن استخدامها فى دفع الغازات المحملة بالاتربة او المواد العالقة .

٣- المراوح ذات الريش المنحنية الى الخلف :
Backward Curved Blade Fans:



Backward Curved Blade Fan

شكل (٦-٤) قطاع فى مروحة ذات الريش المنحنيه الى الخلف

ويتكون قرص ريش هذا النوع من حوالى ١٢ ريشة منحنية الى الخلف فى عكس اتجاه دوران القرص شكل (٦-٤). وتعمل على سرعات عالية وتتميز بكفاءتها خصوصا عندما تكون الغازات خالية من الأتربة والمواد العالقة .

تقدير القدرة الحصانية والكفاءة الميكانيكية للمراوح :

اذا علم المعدل الحجمى لدفع غاز ما ، وكثافته ، ومقدار الضغط الواقع عليه من المروحة فانه يمكن تقدير القدرة الحصانية للمروحة من القانون الآتى :

$$\text{Theoretical Horse Power} = \frac{V.\rho.h}{\text{Standard HP}} \qquad (6-1)$$

حيث أن :

V	=	حجم الغاز المدفوع فى وحدة الزمن	ft^3/min or m^3/min
ρ	=	كثافة الغاز	Lb/ft^3 or kg/m^3
h	=	الرفع الديناميكى الكلى للمروحة	ft or m

Standard Horse Power = 33000 Lb.ft /min

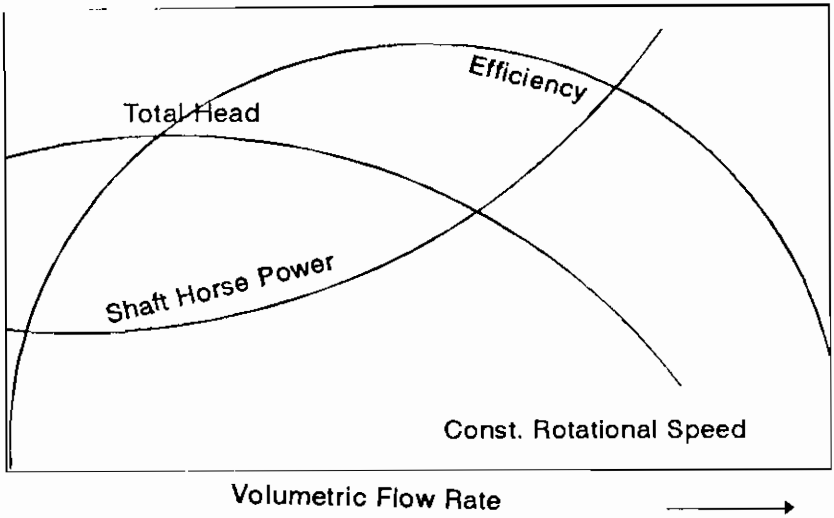
= 4500 kg.m/min

Mechanical Efficiency of Fan ($\eta_{mech.}$)

$$\eta_{mech.} = \frac{\text{Theoretical Air Horse Power}}{\text{Brake Horse Power}} \qquad (6-2)$$

وتعتمد القدرة الحصانية ومقدار الرفع على المعدل الحجمى لتصرف المروحة .

ويبين الرسم البيانى الآتى شكل (٦-٥) نموذج لمنحنيات تشغيل مروحة تعمل بالقوة الطاردة المركزية عند سرعة دورانية ثابتة.



شكل (٦-٥) منحنى أداء أو تشغيل المروحه

واذا تغيرت سرعة دوران عمود ادارة المروحة فتتغير تباعا منحنيات تشغيل المروحة فيتناسب المعدل الحجمي للتصرف تناسبا طرديا مع عدد لفات عمود الادارة ويتناسب الرفع الكلى تناسبا طرديا مع مربع عدد اللفات . وتتناسب القدرة الحصانية تناسبا طرديا مع مكعب عدد اللفات . وسيبين ذلك بالتفصيل عند دراسة المضخات .

ثانيا : المضخات: PUMPS

هى آلات تستخدم فى رفع ودفع السوائل من مستوى الى مستوى آخر . ونظرية عمل المضخات تشابه كثيرا نظريات عمل الضواغط والمراوح ويمكن القول بان الاختلاف الاساسى بين هذه الالات هو ان المضخات او الطلمبات تستخدم فى دفع السوائل بينما تدفع الغازات بواسطة الضواغط والمراوح ، ولو انه هناك بعض المضخات تستخدم فى سحب الغازات والابخرة مثل طلمبات التفريغ Vacuum Pumps.

ويمكن تقسيم المضخات الى الآتى :-

١- مضخات ذات ازاحة ايجابية Positive Displacement Pumps وفيها تسحب وتضغط كمية معلومة ومحدودة من السوائل فى كل دورة او لفة من عمود ادارة الطلمبه.

٢- المضخه الطاردة المركزية Centrifugal Pump وهى شائعة الاستعمال فى عمليات التصنيع المختلفه وتمتاز بانه يمكن تصريف كمية متغيرة من السائل مع تغير مقدار الرفع عند سرعة دوران ثابته .

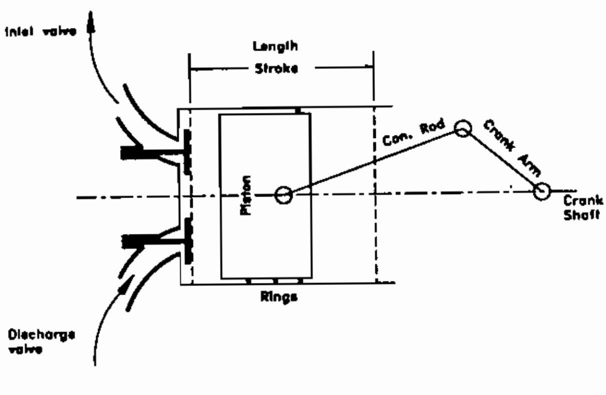
٣- المضخات الخاصه واهمها :

أ- مضخة النافورة Jet Pump وتستخدم الطاقة الناتجة عن سرعة مرور سائل فى ماسورة فى دفع السائل من مستوى الى مستوى أخر . ب- مضخة دفع الهواء Air Lift Pump وتسخدم هواء مضغوط فى دفع السائل بعد ان يختلط به .

مضخات الازاحة الايجابية

ا- المضخة الترددية : Reciprocating Pump

هذا النوع من المضخات يضيف طاقة ضغط الى السائل بواسطة مكبس او ضاغط يتحرك داخل اسطوانة مصنوعة من الحديد الزهر او النحاس المسبوك ، ويصنع المكبس من الصلب او النحاس ويوجد على سطحه تجاويف دائرية توضع فيها حلقات او شنابر من الصلب المرن او الكاوتشوك فائدتها تقليل احتكاك معدن المكبس مع معدن الاسطوانه وعدم السماح للسائل داخل الاسطوانه او لزيوت التشحيم داخل صندوق المرفق من الاختلاط وبذلك يمكن التحكم فى ضغط السائل داخل اسطوانة المضخه كما انها تساعد فى نقل الحراره الناتجه عن الاحتكاك الى الهواء المحيط بالمضخة فلا يتسبب عنها زيادة فى درجة حرارة السائل المراد دفعه .



شكل رقم (٦-٦) قطاع فى مضخه ترددية ذو اسطوانه واحده

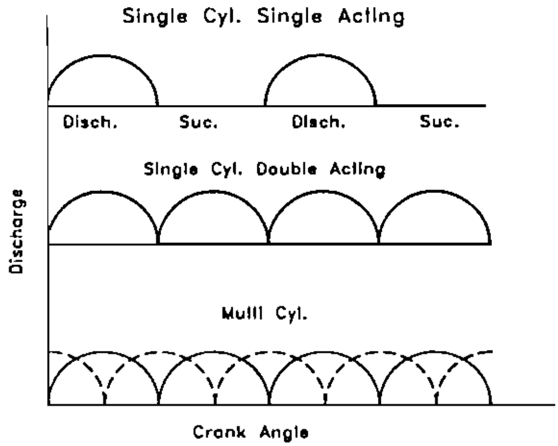
ويوجد فى رأس الاسطوانة صمامان احدهما لدخول السائل والاخر لخروجه ، وهى على هيئة اقراص صغيرة من الجلد او المعدن تفتح وتقفل حسب حركة المكبس ، ويكون فتحتها فى اتجاه حركة خروج السائل بحيث تسمح بمرور السائل الى ماسورة الطرد ولاتسمح له بالارتداد ثانيا .

وفى كل مرة يعمل فيها المكبس مشوارا كاملا Stroke تتصرف كمية ثابتة من السائل خارج الاسطوانة وتعتمد كمية السائل المدفوعة على حجم اسطوانة الطلمبة وعدد المرات التى يقوم فيها المكبس بالحركة داخل الاسطوانه ويلاحظ ان التصرف الحقيقى للمضخة فى المشوار الواحد يقل عن حجم الاسطوانه الفعلى وذلك يرجع الى فقد كمية من السائل نتيجة اما الى تسربها من بين المكبس والاسطوانة لعدم احكام الشنابر او الى عدم ملأ الاسطوانة بالسائل ملأ تاما . لذلك تستخدم الكفاءة او الجودة الحجمية للمضخة الترددية Volumetric Efficiency وتعرف كالآتى :

الجودة او الكفاءة الحجمية ($\eta_{vol.}$)

$$\eta_{vol.} = \frac{V}{V} \qquad (6.3)$$

وتتراوح قيمتها عادة بين ٨٥ ، ٩٥٪ ويلاحظ ان تصرف المضخة يكون على دفعات ويمكن تنظيم التصرف وجعله مستمرا باستخدام مضخة متعددة الاسطوانات او مضخات ذات وجهين (ثنائية التاثير) Double Acting ويبين الرسم البيانى الآتى شكل (٦-٧) كيفية تنظيم تصرف المضخة .



شكل (٦-٧) تنظيم معدل تصرف المضخات الترددية عند التشغيل

وتستخدم هذه المضخات فى حالة الاحتياج الى تصرف بسيط نسبيا ولكن تحت ضغط مرتفع مثل مضخات تجنيس اللبن ويكون ضغطها مرتفع جدا . والمضخات الترددية تكون عادة بطيئة ، وسرعة عمود الدوران تتراوح بين ٢٠ ، ٢٠٠ لفة فى الدقيقة . ويراعى عدم استخدام هذه المضخات للسوائل التى تكون بها مواد معدنية عالقة حتى لاتتآكل جدران الاسطوانة نتيجة لاحتكاك هذه المواد المعدنيه .

ويمكن حساب كمية تصرف الطلمبة الترددية (m) من القانون الآتى :

$$m = \eta_{vol.} \; n. \; \rho. \; L. \; A \qquad (6-4)$$

حيث أن :

A = مساحة مقطع الاسطوانه = πr^2

L = طول مشوار المكبس

ρ = كثافة السائل المراد دفعة

n = عدد لفات عمود الادارة فى الدقيقة.

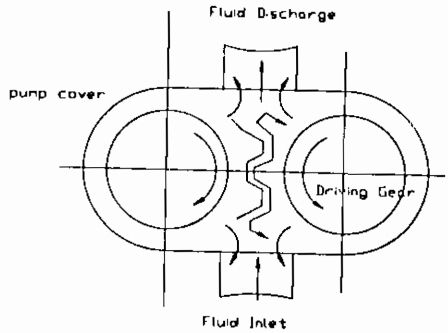
η_{vol} = الكفاءة الحجمية للطلمبة

فاذا كانت h هى مقدار الرفع الديناميكى الكلى للمضخة بوحدات طولية فانة يمكن تقدير القدرة الحصانية النظرية اللازمة لتشغيل المضخة كماياتى :-

القدرة الحصانية النظرية للمضخه ($HP_{theo.}$)

$$HP_{Theo} = \frac{m.h}{Standard\ H.P} \qquad (6\text{-}5)$$

ب- <u>المضخات الدورانية</u> : **<u>Rotory Pumps</u>**



شكل(٦-٨) قطاع فى مضخه ترسيه

هذا النوع من المضخات يعمل على سحب كمية محدودة من السائل المراد دفعه حيث يحبس بين قلب المضخة Rotor والغلاف المحيط به ، وعند الدوران يدفع السائل المحجوز الى فتحة الخروج . ومن اهم تصميمات المضخات الدورانية المضخة الترسية Gear Pump وهى تتكون من ترسين معشقان مع بعضهما ، احداهما ياخذ حركتة الدورانية من عمود محرك او موتور كهربائى ، ويسمى بالترس القائد ويدور الترسان داخل غلاف خارجى به فتحتان احداهما متصله بماسورة السحب والاخرى بماسورة طرد السائل بعد زيادة الضغط الواقع عليه كما هو مبين فى الشكل(٦-٨).

وسرعة هذه المضخات بطيئة نسبيا وتستخدم عند الاحتياج لنقل كميات صغيرة من السائل عند ضغوط متوسطة وقد يصل مقدار السحب فيها الى ٧ متر. وهذه المضخات تستخدم عادة لدفع السوائل ذات اللزوجة العالية مثل الزيوت والعسل والسوائل المركزة والصابون السائل ويمكن تقدير تصرف المضخة الترسية من القانون الآتى :

$$\text{Discharge rate of pump} = 2 \,.\, A.\, l.\, n.\, N.\, \eta_{vol} \qquad (6\text{-}6)$$

حيث أن :

A = المساحة المحصورة بين كل سنة وأخرى وتتناسب مع مربع القطر

l = الطول المحورى للسنة ويتناسب مع القطر

n = عدد اللفات فى الدقيقه

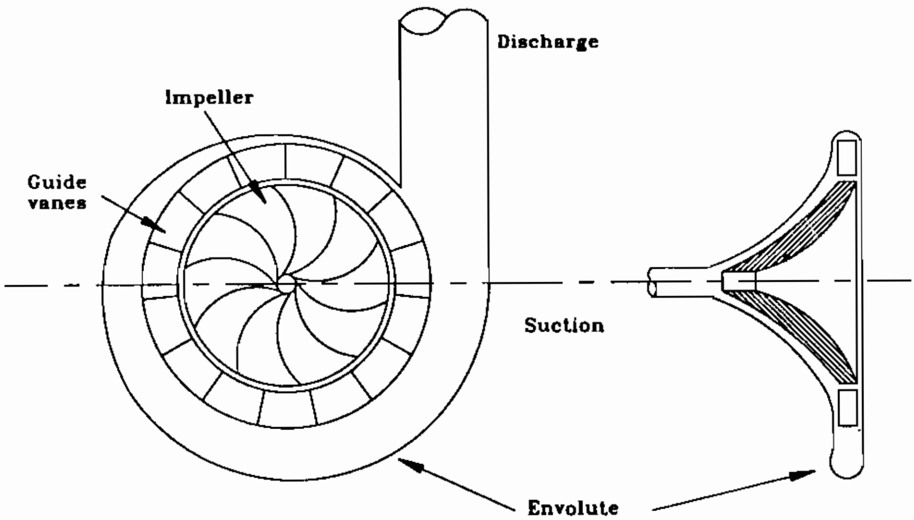
d = قطر دائرة الخطوة للترس

N = عدد اسنان كل ترس

أى ان مقدار التصرف فى الدقيقه = ثابت . $n. d^3$.

٢- المضخات الطاردة المركزية : Centrifugal Pumps

هذه المضخة منتشرة الاستعمال فى عديد من عمليات التصنيع المختلفة وذلك لبساطة تصميمها وسهولة صيانتها ورخص ثمنها . وتمتاز بانها منتظمة التصرف وضغطها غير مرتفع ويمكن استخدامها فى دفع السوائل التى بها مواد عالقة وكثيفة وتستخدم فى حالة الاحتياج الى كميات تصرف عالية عند مقدار رفع متوسط .



شكل (٦-٩) قطاع فى مضخه طاردة مركزيه

وتتكون المضخة المطاردة المركزية من قلب او قرص به ريش يدور داخل غلاف خارجي ذو تصميم تزداد مساحة مقطعه فى اتجاه خروج السائل كما هو مبين فى الشكل (٦-٩) ويدخل السائل عادة من فتحة متصلة بماسورة سحب السائل عند مركز دوران القرص ، ويدفع السائل الى خارج القرص بالقوة الطاردة المركزية وينتج عن ذلك ان طاقة الحركة (الطاقة الكينتيكيه) Kinetic Energy تزيد بمقدار كبير من مركز الدوران الى حافة القرص الخارجية . وهذه الطاقة الناتجة عن السرعة العالية التى اكتسبها السائل تتحول فى الغلاف الخارجي الى طاقة دفع او ضغط مرتفع عند ماسورة الطرد او التصرف.

وقلب المضخة عبارة عن قرص به ريش منحنية بطريقة خاصة لسهولة سريان السائل وهو اما يكون من النوع المفتوح او المغلق حسب نوع السائل المراد دفعه وطريقة الاستعمال فالنوع المفتوح يصلح لدفع السوائل التى بها مواد صلبه عالقه ، والنوع المغلق يكون للسوائل النقيه ، وقرص الريش له تصميمات متعددة لتلائم الغرض المستخدم فيه تماما مثل المراوح التى سبق ذكرها . والطلمبات ذات السرعات العالية تزود عادة بقرص به ريش توجيه Guide Vanes يثبت داخل غلاف المضخه حول قرص الريش الرئيسى كما هو مبين فى الشكل (٦-٩).

ويجب ملاحظة ان المضخات الطاردة المركزية يلزم امتلاء غلافها الخارجي بالسائل تماما عند بدء تشغيلها حيث ان وجود اى كمية من الهواء داخلها يسبب عدم حدوث انخفاض فى الضغط (تفريغ) عند مركز قرص المضخه وبذلك يقل او ينعدم سريان السائل من ماسورة السحب .

ولذلك يجب عند بدء التشغيل ملىء الغلاف الخارجي وماسورة السحب ملأ تماما بالسائل وهذا ما يعرف بعملية تحضير المضخة للتشغيل Priming ويمكن تحضير المضخة اما يدويا بواسطة قمع يوضع فى فتحة فى اعلي بدن المضخه يوصل بخزان السائل او ميكانيكيا بواسطة مضخة تحضير خاصه عادة ماتكون من النوع الماص الكابس .

تقدير سعة المضخة والقدرة اللازمه لتشغيلها :

اذا علمت سرعة سريان السائل فى ماسورة الخروج (التصرف) وكثافة السائل وقطر ماسورة الخروج فان مقدار تصرف المضخة (m) يمكن حسابه كالآتى :

$$m = \rho A V \qquad (6\text{-}7)$$

حيث ان :

V = سرعة سريان السائل

A = مساحة مقطع ماسورة التصرف

ρ = كثافة السائل

ومقدار الرفع الكلى للمضخة هو عبارة عن مجموع الرفع الاستاتيكى الرأسى للسائل او مايعادله ومقدار الفقد فى الرفع نتيجة سريان السائل فى مواسير التوصيل بالاضافه الى طاقة الحركة الناتجة عن سرعة سريان السائل عند فتحة الخروج من ماسورة التوصيل .

$$h = h_s + h_f + \frac{V^2}{2g} \qquad (6\text{-}8)$$

حيث أن :

h = الرفع الكلى للمضخة

h_s = الرفع الاستاتيكى الرأسى للسائل

h_f = الفقد فى الرفع نتيجة للاحتكاك داخل مواسير التوصيل

V = سرعة سريان السائل فى الثانيه

g = عجلة الجاذبية الارضية (٢ر٣٢ قدم/ ث^2 أو ٩٨٠ سم/ث^2)

وفى كثير من الاوقات يلزم توصيل سائل ما الى اسطوانة تحت ضغط اعلى من الضغط الجوى مثل الغلايات او المبخرات ، وعلى ذلك يكون ضغط التشغيل معادل للرفع الاستاتيكى الرأسى فى حالة اذا كان توصيل السائل من خزان الى خزان على مستوى اعلى منه وتحكم العلاقه الآتيه التحويل المطلوب :-

$$h_s = \frac{P}{\rho} \qquad (6\text{-}9)$$

حيث P هى ضغط التشغيل ، ρ هى كثافة السائل بالوحدات المناظرة وتكون القدرة الحصانية النظرية لتشغيل المضخة كما يأتى :

Theoretical Pump Horse Power: ($\eta_{Theo.}$)

$$\eta_{Theo.} = \frac{\text{Discharge x Total Head}}{\text{Standard Horse Power}} \qquad (6\text{-}10)$$

ونتيجة لاحتكاك السائل على اسطح ريش قلب المضخة وريش التوجيه والسطح الداخلى لغلاف المضخه ، ويحدث هناك فقد فى القدرة ويلزم لادارة المضخة قدرة اعلى من قدرتها النظرية ، وتعبر عن ذلك الكفاءة الهيدروليكية للمضخة:

Hydraulic Efficiency of Pump: ($\eta_{Hy.}$)

$$\eta_{Hy} = \frac{\text{Theo. Horse Power}}{\text{Shaft Horse Power}} \qquad (6\text{-}11)$$

وعادة مايتصل عمود ادارة المضخة بعمود المحرك عن طريق وصله مرنه Coupling عبارة عن قرصين من المعدن متصلين ببعضهما بواسطة مسامير ربط ، او عن طريق طارات متصلة ببعضها بواسطة سيور مبططه او على شكل حرف V ، او عن طريق تروس أما معشقه مع بعضها أو متصله بجنزير من المعدن . وعلى ذلك يكون هناك فقد ميكانيكى فى القدرة حتى تصل الى عمود ادارة المضخه ويعبر عن ذلك الكفاءة الميكانيكيه لتوصيل الحركة .

Mechanical Efficiency of Pump ($\eta_{mech.}$)

$$\eta_{mech.} = \frac{\text{Shaft Horse Power}}{\text{Brake Horse Power}} \qquad (6\text{-}12)$$

ويمكن تلخيص ماسبق فى القانون الآتى :

Brake Horse Power of Pump (B.H.P)

$$\text{B.H.P.} = \frac{\text{Pump Discharge x Total Head}}{\eta_{mech.} \times \eta_{Hy} \times \text{Standard H.P.}} \qquad (6\text{-}13)$$

وكثيرا ما تواجهنا فى عمليات التصنيع ظروف تحتم علينا تغيير سعة المضخه ومقدار دفعها ويمكن التحكم فى هذه التغيرات من العلاقات الآتيه :

١- مقدار التصرف يتناسب تناسبا طرديا مع سرعة دوران عمود ادارة المضخه :

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \frac{N_1}{N_2} \qquad (6\text{-}14)$$

٢- مقدار الرفع يتناسب تناسبا طرديا مع مربع سرعة الدوران :

$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^2 \qquad (6\text{-}15)$$

٣- القدرة اللازمه للتشغيل تتناسب طرديا مع مكعب سرعة الدوران :

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{N_1}{N_2}\right)^3 \qquad (6\text{-}16)$$

وفى بعض الاحيان يلزم تغيير قرص ريش المضخة بقرص مشابه ولكن بقطر مختلف لمواجهة احتمالات تغير ظروف التصنيع وذلك عند سرعة دوران ثابته لعمود ادارة المضخة ، ويمكن حساب ذلك من العلاقات الآتيه :-

١- مقدار التصرف يتناسب مع مكعب قطر قرص الريش

$$\frac{Q_1}{Q_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^3 \qquad (6\text{-}17)$$

٢- مقدار الرفع يتناسب مع مربع القطر.

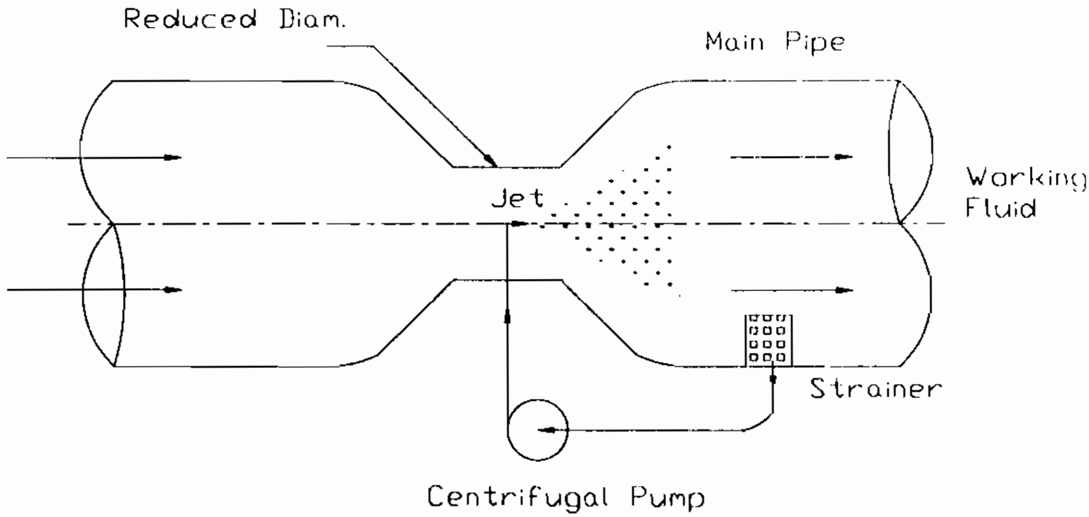
$$\frac{h_1}{h_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^2 \qquad (6\text{-}18)$$

٣- القدرة اللازمة لادارة المضخه تتناسب مع الأس الخامس للقطر .

$$\frac{HP_1}{HP_2} = \left(\frac{D_1}{D_2}\right)^5 \qquad (6\text{-}19)$$

٢- المضخات الخاصه

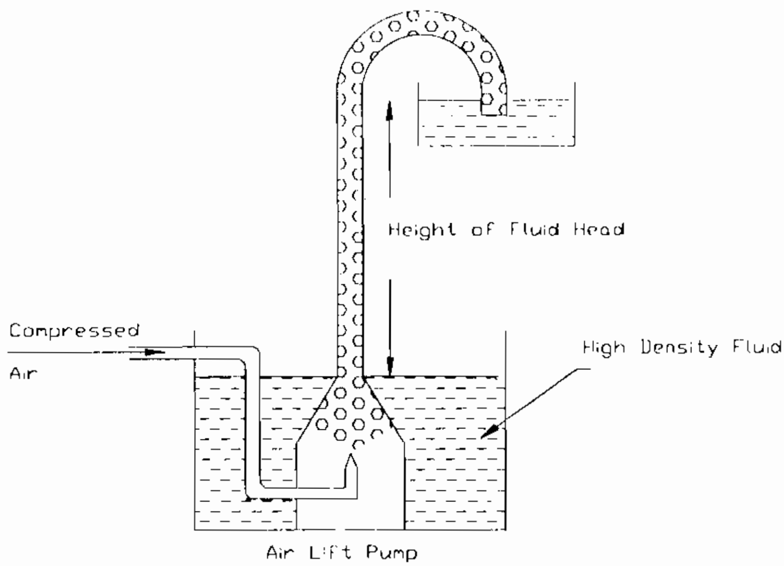
أ - مضخة النافورة : Jet Pump



شكل(٦-١٠) قطاع فى نظام مضخة النافوره

تستخدم فى دفع السوائل ذات الكثافة العالية والتى بها مواد عالقه بكثرة كالمعلقات وفضلات التصنيع المختلفة والتى لايلائمها استخدام المضخات الطاردة المركزية ونظرية تشغيل هذه المضخه تتلخص فى وجود نافورة من السائل من اختناق او عنق ماسورة التشغيل كما هو مبين فى الشكل (٦-١٠). هذه النافورة متصلـه بمضخة طاردة مركزية تقوم بسحب السائل بدون المواد العالقه به من ماسورة التشغيل الرئيسية وتدفعه الى النافورة . ونتيجة لسرعة مرور السائل من النافورة بفعل القوة الطاردة المركزية يحدث تفريغ او منطقة ضغط منخفض فى اختناق ماسورة التشغيل وبذلك يسحب السائل المراد نقله الى المنطقة التى توجد امام النافورة .

ب- **مضخة دفع الهواء : Air Lift Pump**



شكل (٦-١١) قطاع فى مضخة صخ الهواء

وتستخدم فى دفع السوائل ذات الكثافه العاليه او التى بها نسب مرتفعه من الاحماض والتى لايلائمها استخدام المضخات الاخرى نتيجة لتآكل معدنها من هذه الاحماض ، كما هو موضح فى شكل (٦-١١) ويستخدم فيها هواء تحت ضغط يساوى على الاقل ارتفاع عمود السائل فى الخزان ونتيجة لذلك يرتفع مخلوط الهواء والسائل (كثافة المخلوط تكون اقل من كثافة السائل) فى ماسورة الرفع الى المستوي المراد نقل السائل اليه .

الباب السابع

النقل الآلى للمواد الغير سائلة

MECHANICAL HANDLING OF MATERIALS

نقل المواد عادة يعنى حركتها فى اى اتجاه ويشمل ذلك حركتها مباشرة الى اعلى او اسفل او بميل او حركتها افقيا . وتمر المواد الصلبه (الغير سائله) والنصف صلبه (العجائن) بمراحل عديدة اثناء تصنيعها وبالتالى فانها تنقل بواسطة انواع متعددة من وسائل النقل .

فاذا تتبعنا مادة ما من وقت استلامها بالمصنع الى ان يتم تصنيعها وتخزينها فانها تمر بالخطوات الآتيه :-

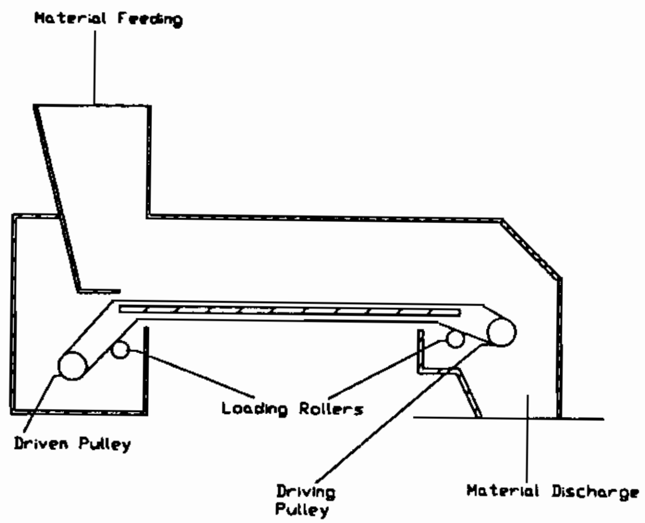
١- التفريغ من عربات النقل .
٢- وضع المادة على عربات خاصة تسمى الزحافات Skids.
٣- استخدام الاوناش Cranes او عربات الشوكة Fork Trucks فى نقل الزحافات الى اماكن المراجعه والتفتيش ثم تنقل مره اخرى الى المخازن العامة.
٤- تفريغ المواد على ناقل او اكثر Conveying Elevator وتنقل بواسطتها الى اعلى لتخزينها فى المخازن .
٥- تنقل المواد من المخازن بواسطة عربات الشوكة او السواقى Bucket Conveyors الى اماكن التصنيع .
٦- تستخدم السواقى او الناقلات الحلزونية (البريميه) Screw Conveyors فى تلقيم احدى ماكينات التصنيع .
٧- تنقل المادة من آلة الى اخرى حتى تتم عملية التصنيع التاليه وتستخدم فى نقلها السيور الناقله Belt Conveyors او البريمات الناقلة .
٨- بعد الانتهاء من عمليات التصنيع المختلفة تنقل المادة المصنعه باحدى وسائل النقل المناسبة الى اماكن التخزين حيث يتم توزيعها من المصنع .

والوسائل المستخدمه فى النقل يمكن تقسيمها كالآتى :

١- السيور الناقلة Belt Conveyors
٢- الجنازير او السلاسل الناقله Chain Conveyors
٣- الناقلات الحلزونيه (البريمات الناقلة) Screw Conveyors
٤- القواديس والسواقى الرافعة Bucket Elevators
٥- الناقلات المستخدمه للجاذبيه الأرضية Gravity Flow Conveyors
٦- الناقلات المستخدمه لشفط او دفع الهواء Pneumatic Conveyors
٧- الأوناش Cranes
٨- المصاعد والعربات Lift and Carrying Trucks

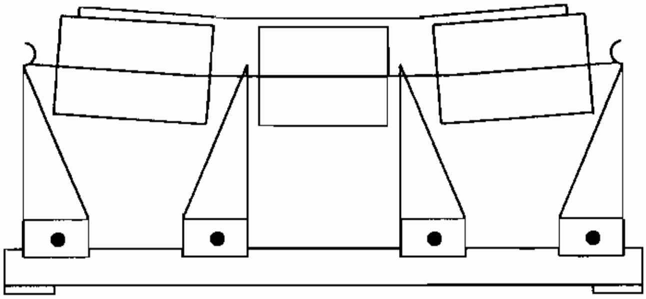
وفيما يلى شرح مختصر عن خصائص ومميزات واستخدامات هذه الانواع :-

١- السير الناقل : Belt Conveyor



شكل (٧-١) قطاع فى سير ناقل

هو عبارة عن سير لا نهائى (شكل ٧-١) يدور حول طارتين او بكرتين احداهما متصله بموتور او عمود حركة وتسمى البكرة او الطارة القائدة Driving Pulley والاخرى الطارة التابعة Driven Pulley. وعادة يحمل السير على عدة بكرات حرة تسمى بالايدلر Idler شكل (٧-٢).



Rollers For Support of Flat Belt

شكل (٧-٢) بكرات تحميل السير الناقل

خصائص السير الناقل :

١- له كفاءة ميكانيكيه عاليه .
٢- لايتسبب فى تلف المواد المنقولة وذلك لانه لاتوجد حركة نسبية بين المادة المنقولة والسير .
٣- يعمل على سرعات عاليه وينتج عن ذلك ان سعة نقل السير تكون عاليه .
٤- يتحمل مدة تشغيل طويلة .
٥- يستخدم لنقل المواد لمسافات طويلة .
٦- زاوية ميل السير محدودة تتراوح بين ١٥ - ٢٥ درجة.
٧- سعر انشاؤه مرتفع نسبيا .

الشروط الواجب توافرها فى السير الناقل:

١- يجب ان يكون السير ذو مرونة عاليه حتى يتمشى مع الاقطار المختلفة للطارات. ويكون مصنوع من مادة خاصة تتحمل الشد والضغط وتقاوم عوامل التشغيل المختلفه كالاحماض ودرجات الحرارة المختلفه .

وهذه المواد تكون اما من :

أ- نسيج الكانفاس Stitched Canvas
ب- النسيج المجدول Solid Woven
ج- بالاتـــــا Balata
د- المطـــاط Rubber belt

والنوعين أ ، ب يكونا عادة مشبعان بالكاوتشوك ومغطاه بطبقة من المطاط.

٢- يجب ان يكون عرض السير متناسبا مع كمية المادة المنقولة ونوعها وخصائصها.

٣- تكون الطارة القائدة دائما فى ناحية التفريغ .

٤- يجب ضبط شد السير دائما وذلك لان طوله يتغير بتغيير درجات الحرارة والرطوبة ويمكن اجراء ذلك اما يدويا بواسطة مسامير الضبط او اتوماتيكيا بتحميل اثقال اضافيه فى جهاز الشد .

٥- بكرات التحميل Idler Pulleys تكون اما من الخشب او من الصلب ، وذلك فى حالة السيور المسطحه Flat Belts او تأخذ البكرات شكل المجرى لزيادة السعه Troughed Belts كما هو موضح فى الشكل (٧-٢) .

٦- يجب الايزيد ميل السير عن ١٥° - ١٧° عند نقل الحبوب الصغيرة ولا يزيد عن ١٨° - ٢٠° عند نقل الحبوب الكبيرة ، ٢٠° الى ٢٢° عند نقل المساحيق .

الحسابات الأولية لتصميم سير ناقل :

١- يتحدد عرض السير بمعرفة نوع المادة المراد نقلها وحجمها ومعدل نقلها . ويمكن حساب مساحة مقطع السير اذا علم مقدار زاوية تحميل المادة وهى الزاويه المحصوره بين الخط الافقى والمماس لمنحنى تكويم المادة وهى تختلف باختلاف المواد وتتراوح بين ١٠° ، ٣٠° وتكون هذه الزاويه كبيره فى حالة نقل المواد الكبيرة الحجم خصوصا عند اختلاطها بمساحيق دقيقة وجدول (٧-١) يبين مساحة مقطع التحميل لمواد مختلفة والسرعة القصوى لنقل هذه المواد .

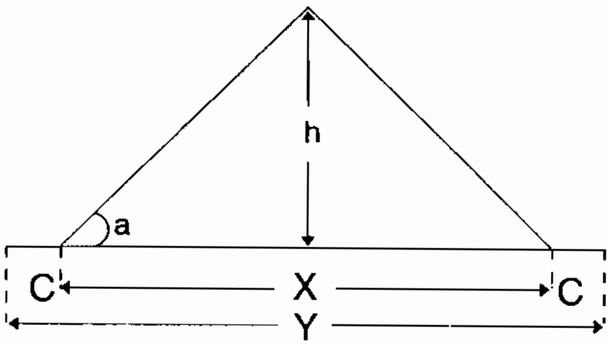
جدول (٧-١) المواصفات الخاصه بالسيور الناقله لسرعات مختلفة

عرض السير	خلوص الحافه	مساحة مقطع التحميل (سم٢)			السرعه القصوى (متر/دقيقه)	
سم	سم	١٠°	٢٠°	٣٠°	مساحيق	حبوب غير خشنه القوام
٣٥.٥٦	٤.٣٢	٦٨.٨٢	٨٩.٢٨	١٠٨.٨١	٩١.٤٦	١٢١.٩٥
٤٠.٦٤	٤.٥٧	٩٣.٩٣	١٢١.٨٣	١٥٠.٦٦	٩١.٤٦	١٣٧.٢٠
٤٥.٧٢	٤.٨٣	١٢٤.٦٠	١٦٠.٨٩	١٩٩.٠٢	١٢١.٩٥	١٣٧.٢٠
٥٠.٨٠	٥.٠٨	١٥٨.١٠	٢٠٤.٦٠	٢٥٢.٩٦	١٢١.٩٥	١٥٢.٤٤
٦٠.٩٦	٥.٥٩	٢٣٩.٠١	٣٠٨.٧٦	٣٨١.٣٠	١٥٢.٤٤	١٨٢.٩٣
٧٦.٢٠	٦.٣٥	٣٩١.٥٣	٥٠٤.٠٦	٦٢٢.١٧	١٦٧.٦٨	٢١٣.٤٢
٩١.٤٤	٧.١١	٥٧٨.٤٦	٧٤٦.٧٩	٩٢١.٦٣	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩٠
١٠٦.٦٨	٧.٨٧	٨٠٨.١٧	١٠٤١.٦٠	١٢٧٤.١٠	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩٠
١٢١.٩٢	٨.٦٤	١٠٧٨.٨٠	١٣٧٦.٤٠	١٧٠١.٩٠	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩٠
١٣٧.١٦	٩.٤٠	١٣٤٨.٥٠	١٧٦٧.٠٠	٢١٦٦.٩٠	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩٠
١٥٢.٤٠	١٠.١٦	١٧٠١.٩٠	٢١٩٤.٨٠	٢٧٠٦.٣٠	١٨٢.٩٣	٢٤٣.٩٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

حساب مساحة مقطع تحميل السير :

أ- السير المسطح : Flat Belt



شكل (٧-٢) مقطع تحميل السير المسطح

يمكن تبسيط الحسابات الخاصة بمساحة مقطع التحميل باعتبار المادة المراد نقلها (في حالة الحبوب والمساحيق فقط) على اساس تقريب المقطع الى شكل مثلث هندسى متساوى الساقين قاعدته تقل عن عرض السير الحقيقى بمقدار ضعف خلوص حافتى السير . وزاويته تساوى زاوية التحميل او الراحه وارتفاعه بارتفاع منتصف تكويم المادة شكل (٧-٢). وتكون ظل زاوية الراحة مساويا لمعامل احتكاك المادة مع مادة السير . وتقدر المساحة الحقيقيه لمقطع التحميل بحوالى ٩٠ فى المائه من المساحة المحسوبة هندسيا .

$$A = \frac{1}{2} x \, h$$

$$A = \frac{1}{2} x \, . \frac{1}{2} x \tan a$$

$$= \frac{X^2}{4} \tan a$$

$$= \frac{X^2}{4} f$$

حيث :

$$X = Y - 2C$$

Y = عرض السير الحقيقى

C = مقدار الخلوص (الجزء من السير المتروك بدون تحميل لضمان عدم سقوط المادة)

h = ارتفاع تكويم المادة المنقولة

X = طول قاعدة تكوين المادة

f = معامل الاحتكاك بين المادة والسير $f = \tan a$

a = زاوية التحميل أو الراحة

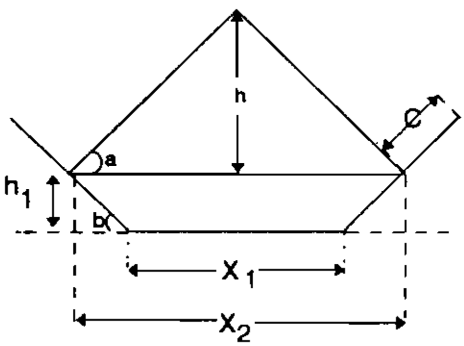
والجدول الاتى جدول (٧-٢)يعطى معامل الاحتكاك لبعض المحاصيل (رطوبة ٢٠٪ ، مواد غريبه ٥٪):

جدول (٧-٢) معامل الاحتكاك لبعض المحاصيل

نوع الحبوب	الوزن النوعى كجم/م٣	f				
		حبوب على حبوب	حبوب على سطح خشن	حبوب على سطح ناعم	حبوب على حديد	حبوب على اسمنت
قمح	٨٠١.٩٥	٠ر٤٦٦	٠ر٤١٢	٠ر٣٦١	٠ر٤١٤	٠ر٤٤٤
ذرة	٧٠٥.٧٢	٠ر٥٢٠	٠ر٣٤٤	٠ر٣٠٨	٠ر٣٧٤	٠ر٤٢٣
فول	٨٠١.٩٥	٠ر٤٧٠	٠ر٢٩٠	٠ر٩٧٠	٠ر٢٦٠	٠ر٣٠٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

ب- السير ذو المجري : **Troughed Belt**



شكل (٧-٤) مقطع تحمي السير ذى المجرى

ويمكن حساب مقطع السير ذو المجرى على اساس انه شبه منحرف يعلوه مثلث تكويم المادة (شكل ٧-٤) :

مساحة مقطع التحميل =٩. .   مساحة المثلث + مساحة شبه المنحرف

$$\frac{1}{2}(X+X_1)\,h_1 + 0.9\,\frac{X^2}{4}f = A$$

$$\therefore\ h_1 = \frac{X - X_1}{2}\tan b$$

$$\therefore\ A = 0.9\,\frac{X^2}{4}f + \frac{X^2 - X_1^2}{4}\tan b$$

حيث ان :

Y = العرض الحقيقى للسير المجرى
X = المسقط الافقى لعرض السير
X_1 = عرض البكرة السفليه الافقيه الوسطى
X_2 = عرض الجزء المحمل من السير على كل من مستوى الجانبين
h = ارتفاع تكويم المادة بالنسبة لحواف السير
h_1 = ارتفاع المادة عن قاع السير حتى حوافه
a = زاوية التحميل او الراحه
b = زاوية ميل البكرات الجانبيه المكونه لمجرى السير

ويلاحظ فى هذه الحالة ان : $X_1 + 2X_2 = Y - 2C$

حساب القدرة اللازمه لتشغيل سير ناقل :

تعتمد القدرة المطلوبه لتشغيل سير ناقل على العوامل الآتيه :

١- مقدار الرفع .
٢- مقاومة احتكاك السير ومشتملاته (البكرات وغيرها) .
٣- مقدار ميل السير .

وعلي ذلك يمكن حساب القدرة اللازمه لتشغيل سير ناقل (شكل ٧-٥) كحاصل جمع الخطوات الثلاث الآتيه :

١- القدرة اللازمه لتشغيل سير خال من الحمل

$$HP_1 = \frac{f_1 m_1 LV}{Const.} \quad (7-1)$$

٢- القدرة اللازمه لتشغيل السير المحمل فى مستوى أفقى

$$HP_2 = \frac{f_2 m_2 L}{Const.} \quad (7-2)$$

٣- القدره اللازمه لتشغيل سير لنقل الحمل رأسيا

$$HP_3 = \frac{m_2 h}{Const.} \quad (7-3)$$

حيث ان :

f_1 = معامل الاحتكاك بين الاجزاء المتحركة والثابتة فى السير ومشتملاته.

m_1 = وزن السير لكل وحدة طوليه (رطل/قدم أو كجم/متر).

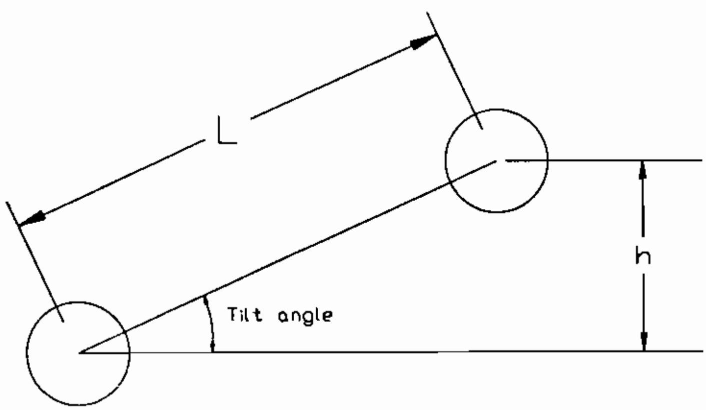
L = طول السير (المسافه الافقيه بين مركزى الطارتين) .

m_2 = المعدل الوزنى لنقل المادة (رطل/ساعة او كجم/ساعه).

V = سرعة السير

f_2 = معامل الاحتكاك بين الحبوب والسير

h = مقدار الرفع (ارتفاع مستوى التفريغ عن مستوى التحميل)



شكل (٧-٥) سير ناقل مائل

الجنزير الناقل
CHAIN CONVEYOR

هو من وسائل النقل المنتشرة الاستعمال اذا كان المطلوب "النقل المتقطع".

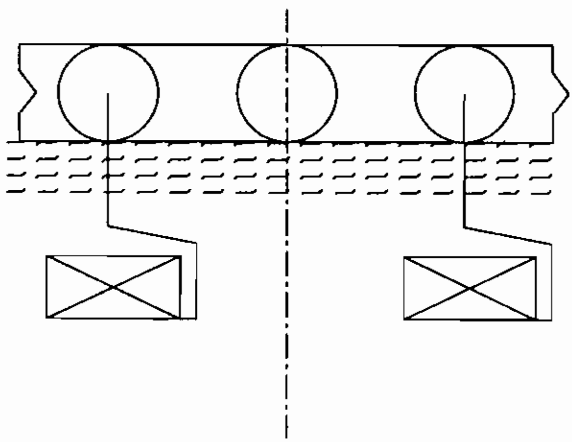
خصائص الجنزير الناقل :

١- كفاءته الميكانيكية ليست عالية.
٢- سعره الانشائى معتدل .
٣- يصدر اصواتا مرتفعة عند تشغيله .
٤- حركته بطيئة.

أنواعـــه :

١- الترولى او الجنزير الهوائى Trolly, Overhead or Monorail
٢- الجنزير الجارف Scraper Conveyor
٣- الجنزير الطبلية Apron Conveyor

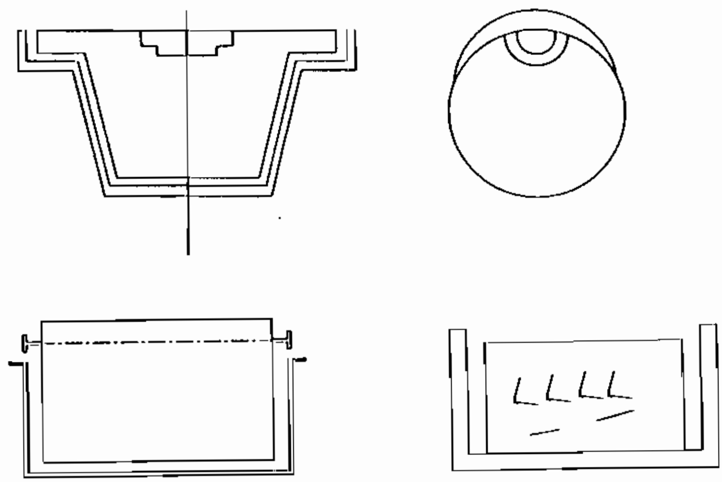
أولا : الجنزير الترولى



شكل (٧-٦) قطاع فى جنزيرين تروللى

ويتكون من كمرة حديد على شكل (I) مثبته فى اعلى المبنى ويتحرك على حافتها السفلى بعجل او بكرات متصله ببعض بواسطة جنزير ويعلق بهذه البكرات خطافات لحمل الاثقال والمواد المراد نقلها كما هو مبين فى شكل (٧-٦) ويستعمل الجنزير الترولى عادة فى نقل اللحوم فى السلخانات والموز وصناديق الفاكهه فى وحدات الحفظ والتجفيف والتسويه. ويتميز الجنزير الترولى بانه مرن جدا حيث انه يمكن تغيير اتجاهه حتى °١٨٠ ويمكن استعماله على زاوية ميل عالية بخلاف السير الناقل .

ثانيا : الجنزير الجارف

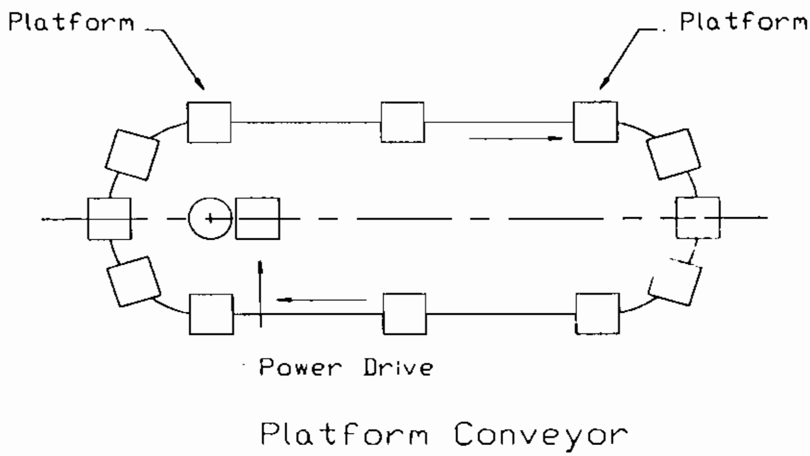


شكل (٧-٧) مقاطع مختلفه للجنزير الجارف

ويستخدم فى نقل الحبوب والمواد الغير خشنة القوام مثل البنجر والبطاطس ويمكن استعماله على زاوية ميل عالية غير انه يتطلب قدرة تشغيل عالية جدا علاوة على ان تكاليف صيانته عاليه . ويتكون الجنزير الجارف (شكل ٧-٧) من حواجز عرضية مصنوعه من الحديد او الخشب متصلة ببعضها بواسطة جنزير وتتحرك داخل مجرى لنقل المواد بطريق الجرف وتختلف هذه الحواجز العرضية فى الشكل والتصميم لتلائم خواص المادة المراد نقلها فتستخدم الحواجز المنخفضة فى نقل المواد الكبيرة الحجم مثل قوالح الذرة والبنجر والبطاطس والحواجز المرتفعه للحبوب الصغيرة وما شابهها . ويصمم الحاجز بحيث يكون ارتفاعه ٤٠٪ من طوله وتتباعد الحواجز عن بعضها بمسافة تساوى طول الحاجز .

وسرعة الجنزير تتراوح بين ٧٥ - ١٢٥ قدم/دقيقه وتستخدم السرعه البطيئة فى حالة نقل مواد كبيرة الحجم مثل قوالح الذرة والبصل والبطاطس وما شابهها والسرعات المرتفعة لنقل المواد الدقيقة كالحبوب والغلال .

ثالثا: الجنزير الطبلية



شكل (٧-٨) مسقط أفقى لجنزير طبليه

اذا استبدلت حواجز الجنزير الجارف العموديه بمسطحات من الصلب والخشب فان الجنزير يسمى بجنزير طبلية (شكل ٧-٨) ويستعمل فى نقل المواد المعبئة فى اجولة او فى صناديق او مواد ذات احجام كبيرة.

<u>الحسابات الأولية لتشغيل جنزير ناقل</u> :

١- **<u>سعة الجنزير الترولى</u>**

=سرعة الجنزير الناقل × عدد الخطافات فى وحدة الطول × سعة الخطاف الواحد

٢- **<u>سعة الجنزير الجارف</u>**

= عرض الجنزير × ارتفاعه × سرعة الجنزير × كثافة المادة المنقولة

والسعه الحقيقيه تزيد عن هذه السعة النظرية بمقدار ١٥٪ ، وذلك لتكويم المادة المنقولة عادة بمستوى اعلى من ارتفاع الحاجز .

واذا كان الجنزير الجارف يعمل على مستوى مائل فان سعته تقل حسب درجات الميل كما يأتى :

درجات الميل	نسبة السعه الحقيقيه الى السعه النظريـــه
٢٠°	٧٧ر٠
٣٠°	٥٥ر٠
٤٠°	٣٢ر٠

٣- <u>سعة الجنزير الطبلية</u> :

تحتسب سعة الجنزير الطبليه على اساس ان كل طبلية تحمل نفس الكمية التى تحملها كل من الطبالى الاخرى وتكون السعه بوحدات وزن/زمن :

سرعة الجنزير × عدد الطبالى فى وحدة الطول × سعة الطبليه الواحدة بالوزن

٤- <u>القدرة النظرية اللازمه لتشغيل جنزير ناقل</u> :

وتساوى مجموع القدرات اللازمه لتشغيل الجنزير الناقل خال من المواد والقدره اللازمه لتشغيل الجنزير بما عليه من مواد فى الاتجاهين الافقى والرأسى ويمكن حسابها من القانون الآتى :-

$$\text{Horse Power} = \frac{2V\,L\,m_1\,f_1 + m\,(f_2 L + h)}{\text{Const.}} \qquad (7\text{-}1)$$

حيث أن :

V = سرعة الجنزير

L = المسقط الافقى لطول الجنزير المحمل

m_l = وزن الجنزير لكل وحدة طولى

f_1 = معامل الاحتكاك للجنزير والحواجز

m = سعة الجنزير

f_2 = معامل الاحتكاك للمواد المنقولة مع معدن الجنزير

h = مقدار الرفع الرأسى

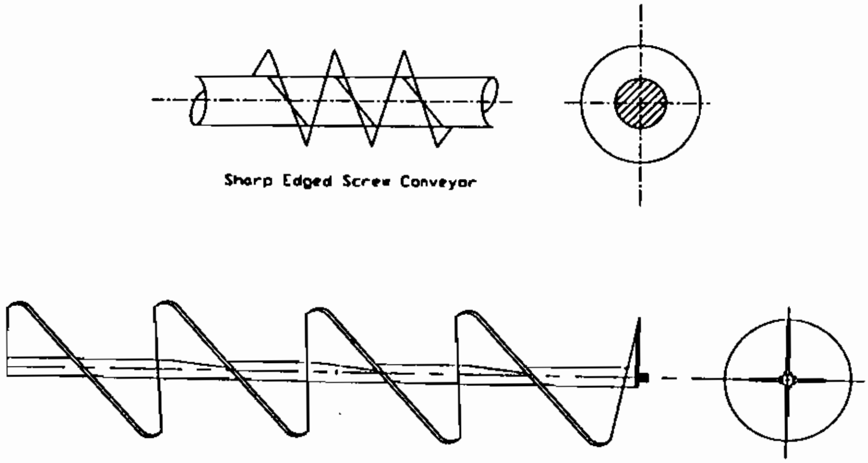
وتستخرج قيمة معاملات الاحتكاك f_1 ، f_2 من الجدول رقم (٧-٣) :

جدول (٧-٣) معاملات الاحتكاك بالانزلاق

المـــــادة	معامل الاحتكاك f_1 ، f_2
معدن على خشب زان	٥ر٠ - ٦ر٠
زهر على حديد مطاوع	٢٣ر٠
حديد مطاوع على حديد مطاوع	٥٧ر٠
حبوب علــى خشب	٣٠ر٠ - ٤٥ر٠
حبوب على حديـــد	٣٥ر٠ - ٤٠ر٠
فحم على معــــدن	٣٥ر٠ - ٤٠ر٠
رمل جاف على معدن	٦٠ر٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

البريمه الناقلة : Screw Conveyor



شكل (٧-٩) مقاطع مختلفه للبريمه الناقله

وهى عبارة عن حلزونه (لولب) تلتف حول عمود او محور الدوران بخطوة قياسية ثابته Standard Pitch أي انها تتخذ وضع مماثل على مسافات ثابتة . ويدور عمود الحركة داخل كراسى مثبته على قاعدة التحميل . وتدور البريمة الناقلة داخل مجرى على شكل حرف U بغطاء او بدون غطاء حسب الغرض من التشغيل .

خصائص البريمة الناقلة :

١- تستخدم فى نقل الحبوب والمساحيق والمواد ذات اللزوجه العالية (اللبن الجاف والاعلاف والارز).
٢- بسيطة التصميم خالية من الاطراف الحادة وتمنع تطاير الاتربه منها كما انها سهلة الفك والتركيب .
٣- تستخدم للنقل المتقطع او المستمر .
٤- لاتنقل او ترفع المواد الا لمسافات محدودة .
٥- تكاليف صنعها معتدله .
٦- القدرة اللازمه لتشغيلها مرتفعه نوعا ما .
٧- تستخدم لنقل المواد افقيا او علي ميل اقصاه ٢٠° .

المواد المستعمله فى صناعة البريمات :-

تستعمل خامات مختلفة فى صناعة البريمات حسب المواد المراد نقلها . فتصنع البريمه احيانا من الصاج ، او من الخشب ، او من الصلب الغير قابل للصدأ او من النحاس او الزهر حسب المواد المنقوله سواء كانت ساخنه او كاوية Corrosive وأحيانا يغطى سطح البريمة بطبقة صلدة عندما تكون المواد المنقولة ذات قوام خشن جدا .

الحسابات الاوليه لتشغيل بريمة ناقله :

١- تحديد السعة النظريه للبريمه : ويمكن حسابها من القانون الآتى :

$$\text{Screw Conveyor Capacity} = \frac{\pi}{4}\left(D_1^2 - D_2^2\right) P.n \qquad (7\text{-}2)$$

حيث ان :

D_1 = قطر البريمة

D_2 = قطر عمود الادارة .

P = خطوة البريمة (تساوى عادة D_1) .

n = عدد لفات عمود الاداره فى وحدة الزمن .

والخطوه القياسيه تساوى فى معظم البريمات الافقيه قطر البريمه وفى البريمات التى تعمل على ميل تساوى عادة نصف قطر البريمه وتوجد بعض بريمات ذات خطوه قياسيه متغيرة وتستعمل فى الحالات الخاصة كنقل المواد الثقيلة والتى لها لزوجة عالية ، كذلك عندما تستعمل الناقلات فى ضبط مقدار التصرف وتنظيمه .

والسعه الفعليه للبريمه الناقله تقل كثيرا عن السعه النظرية وتعتمدعلى المسافه بين حافة البريمة والغطاء او المجرى التى تدور بداخله ، وعلى خواص المادة المنقولة وطول البريمة ومقدار الرفع او الميل المطلوب . وتتراوح قيمة السعة الفعلية للبريمة بين ٥٠ ، ٦٠٪ من السعة النظرية.

٢- تحديد القدرة اللازمة لتشغيل البريمة :

وتعتمد على الآتى :

أ - طول البريمة.

ب- مقدار الرفع المطلوب .

ج - نوع الكراسى التى يدور داخلها عمود البريمة .
د - مقدار احتكاك المادة المنقوله على المادة المصنوعة منها البريمة.
هـ- مقدار تصرف البريمة او سعتها الناقلة .
و - القدرة اللازمة لتقويم Starting بريمة ناقلة .

ويمكن حساب القدرة اللازمه لتشغيل البريمه من القانون الآتى :-

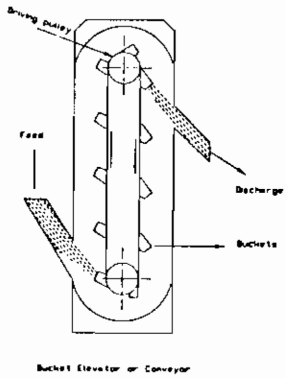
$$\text{Power} = \frac{mL\,\rho\,P_c}{\text{Const.}} \qquad (7\text{-}3)$$

حيث ان :-

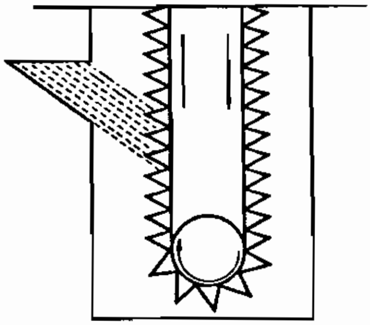
m = السعة الفعلية للبريمة .
L = طول البريمة.
ρ = كثافة المادة المنقولة .
P_c = معامل تصحيح القدرة ووبعتمد على قيمة القدرة.

P_c = ٢ اذا كانت القدرة المحسوبه اقل من واحد حصان .
= ١ر٢٥ اذا كانت القدرة المسحوبه بين ١ الى ٢ حصان.
= ١ر٢٥ اذا كانت القدره المحسوبه بين ٢ الى ٤ حصان .
= ١ر١٠ اذا كانت القدره المحسوبه بين ٤ الى ٥ حصان .
= ١ اذا كانت القدره المحسوبه اكثر من ٥ حصان .

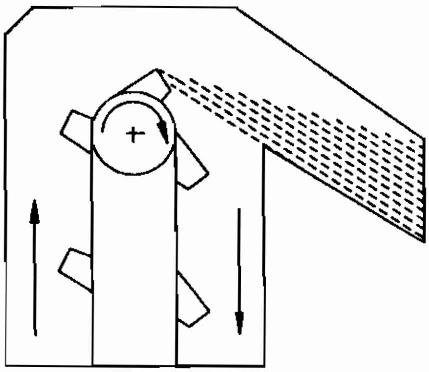
القواديس او السواقى الرافعه : Bucket Conveyor



شكل (٧-١٠) قطاع رأسى فى الناقل ذى السواقى



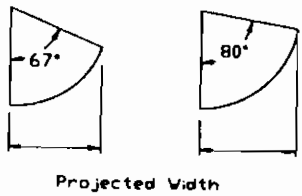
شكل (٧-١١) تغذية الناقل



شكل (٧-١٢) قطاع فى رأسى الناقل

ويمكن اعتبارها حالة خاصه من السير او الجنزير الناقل حيث انها عباره عن مجموعه من القواديس مثبته على مسافات متساويه فى سير ناقل او متصله ببعضها بواسطة جنزير (سلسله) .

والسواقى الرافعه كفاءتها عاليه جدا بالرغم من ان تكاليفها الانشائيه مرتفعه . وترجع كفاءتها العاليه الى ان المواد المنقوله بواسطتها لاتنزلق ولا توجد حركة نسبية بين المادة المنقولة والقواديس المنقولة داخله وهذا هو الفرق الرئيسى بين السواقى الرافعة والجنزير الجارف الشبه عمودى (اشكال ٧-١٠، ٧-١١، ٧-١٢).



شكل (٧-١٢) اشكال مختلفه للقواديس

والقواديس تختلف فى اشكالها حسب المادة المراد نقلها وهى عامة تكون على الشكل المبين بالرسم شكل (٧-١٢).

ووجود الزاويه والقاع المستدير يسهل عملية الملأ والتفريغ والمسافه بين كل قادوس وآخر تتراوح بين ضعف وثلاثة مرات عرض القادوس المسقط Projected Width ويمكن تحديد سعة السواقى الرافعة من المعادله الآتيه :-

سعة الساقية = عدد القواديس فى وحدة الطول × سعة القادوس × سرعة القادوس

وتحسب القدرة اللازمة لتشغيل الساقيه كالآتى :

$$\text{Horse Power} = \frac{m\ h\ P_c}{\text{Standard horse power}} \qquad (7\text{-}4)$$

حيث ان :

m = سعة الساقيه .

h = مقدار الرفع .

P_c = معامل تصحيح القدرة يساوي ١٠ر١ الى ١٥ر١ وذلك لان القدرة الفعلية تزيد بمعدل يتراوح بين ١٠ و ١٥٪ من القدرة النظرية نتيجة للاحتكاك مع طارات الساقية والقدرة اللازمة لبدء حركة الساقية .

الناقلات بالهواء : Pneumatic Conveyors

وتستعمل عادة لنقل المواد المحببة فى انفاق او مجارى مقفله بواسطة السرعة العالية للهواء سواء كان النقل بالشفط او الضغط او الأثنين معا .

خواص النقل بالهواء :

مميزاته :

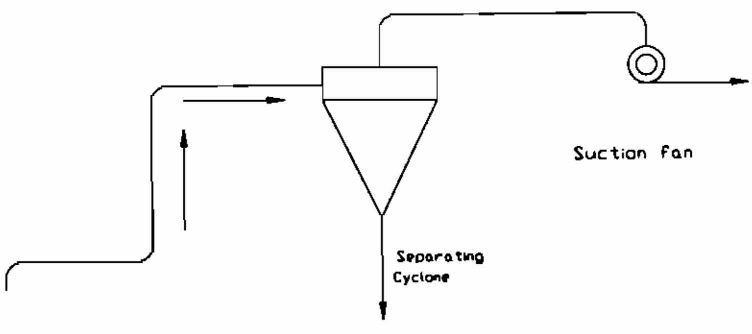
١- سعر انشائى منخفض.
٢- بساطة التصميم والتركيب حيث ان الجزء الرئيسى المتحرك هو المروحه فقط.
٣- يمكن تغيير مسار المواد وتفرعها وتشعبها بمرونة عاليه .
٤- تستخدم فى نقل المواد المختلفه مثل (الغبار ، الالياف ، الرمل ، الحبوب ، المساحيق ، الخرق ، القطن ، وخلافه).
٥- الجهاز ينظف نفسه بنفسه .

عيوبه :

١- يلزمه قدرة عاليه للتشغيل .
٢- احتمال حدوث تلف لبعض المواد المنقوله .

الطرق المختلفه للنقل بالهواء : تتلخص هذه الطرق فى ثلاثة انواع :

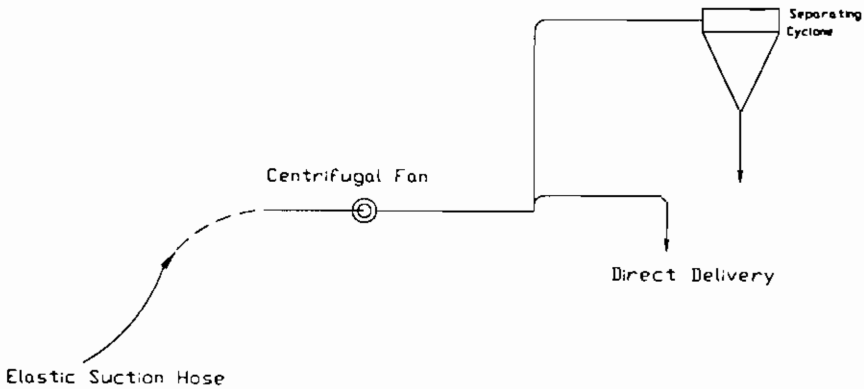
أولا : طريقة الشفط او السحب : Suction



شكل (٧-١٤أ) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وتعمل على ضغط منخفض اقل من الضغط الجوى وتعتبر احسن طريقة لنقل المواد الى اماكن مختلفة كالتفريغ من اللوريات ومقطورات السكة الحديد ونقل الحبوب من السفن وكذلك تستخدم لنقل المواد ذات القوام الخاص الذى لايمر بسهولة من المحابس او المراوح مثل القطن .

ثانيا : طريقة الضغط المنخفض : Low Pressure System

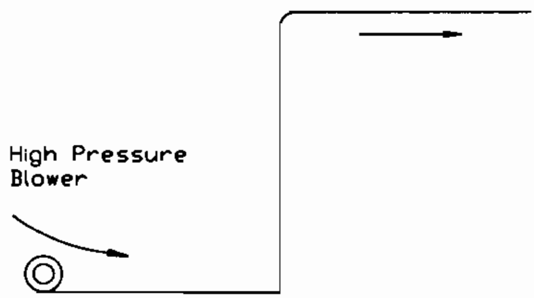


b-Low Pressure System

شكل (٧-١٤ب) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وفيها تستخدم مروحه طاردة مركزيه تستعمل هواء ذو سرعة عاليه وكثافة منخفضه (ضغط الهواء يصل الى ١٤ بوصه ماء رفع).

ثالثا : طريقة الهواء ذو الضغط العالي : High Pressure System



c-High Pressure System

شكل (٧-١٤ج) نماذج لطريقة النقل برفع الهواء تبعا للضغط المستخدم

وفيها تستخدم هواء ذو سرعة منخفضه وبكثافة مرتفعة وعادة تستعمل لهذا الغرض المراوح او ضواغط الهواء Blowers ، ذو الازاحة الايجابيـة مثـل Lobe Blower وتدخل المادة الى المروحه مباشرة او عن طريق خراطيم مرنه وطريقة الضغط العالى اكفأ بكثير عن طريقة الشفط حيث ان كثافة الهواء مرتفعه وسرعته اقل وتستخدم هذه الطريقة عندما تكون اماكن التفريغ او التصرف Discharge متغيرة كتحميل العربات والمقطورات والخزانات .

معدل نقل الهواء :

تختلف سرعة الهواء المستعمل فى النقل بأختلاف حجم حبيبات المادة المراد نقلها وتعتبر سرعة ٥٠ قدم فى الثانية مناسبة للنقل ويجب اضافتها للسرعة اللازمة لجعل حبيبات المادة عالقة بالهواء عندما يكون النقل عمودى . وتتطلب سرعة اكبر فى النقل الافقى حتى يمكن عمل دوامه من الهواء قادرة على حمل حبيبات المادة المراد نقلها .

ويمكن حساب سرعة مرور الهواء من القانون الآتى :-

$$V = 60\,C\,\sqrt{\rho} \qquad (7\text{-}5)$$

حيث ان :

V = سرعة مرور الهواء بالقدم/دقيقة

ρ = كثافة المادة رطل/قدم مكعب

C = معامل يعتمد على المادة والطريقة المستخدمة يستخرج من الجدول (٧-٤):

جدول (٧-٤) قيمة المعامل C

المادة	مجاري مستقيمة وأفقية: مواسير	مجاري مستقيمة وأفقية: خراطيم	مجاري منحنيه وعموديه: مواسير	مجاري منحنيه وعموديه: خراطيم
مساحيق	١٠	١٦	١٢ر٥	٢٠
حبوب	١٢	٢٠	١٥	٢٤
حبوب بها كسر وغير منظمة القوام	١٥	٢٤	١٨ر٧٥	٣٠

المصدر : Henderson and Perry (1976)

وتعتمد كمية المواد المراد نقلها لكل وحدة حجم من الهواء على شفط الهواء وانتظام التلقيم والحجم النوعي للمادة وطريقة نقلها . ففي حالة النقل الافقي تكون كمية الهواء لوحدة من الزمن اقل منها في حالة النقل العمودي وذلك لان معامل الانزلاق بين المادة والهواء يكون اقل . وطريقة النقل ذو الضغط المرتفع ترتفع فيها كمية المادة المنقولة لكل قدم مكعب من الهواء وذلك لارتفاع كثافة الهواء وتعتبر٢-٣ متر مكعب من الهواء لكل كيلو جرام واحد من المادة مناسبة لطريقة النقل بالضغط المرتفع .

الباب الثامن

البخــــار Steam

توليد البخار وخواصه

Steam Generation and Properties

تكون بخار الماء :

اذا وضعت وحدة وزنيه من الماء النقى فى اناء ذو غطاء عند درجة حرارة الصفر المئوى أو ٣٢°ف واضيفت الى الاناء كمية من الحرارة تحت ضغط ثابت فان درجة حرارة الماء سوف ترتفع تدريجيا الى ان يصل الماء الى درجة الغليان Boiling Point وتعتمد درجة حرارة الغليان على الضغط الموجود على الماء ، فنجد مثلا انه عند الضغط الجوى العادى أى ٧ر١٤ رطل/بوصه مربعه تكون درجة حرارة الغليان ٢١٢°ف (واحد كجم/سم^{٢}- درجة الغليان ١٠٠°م)، ويلاحظ انه كلما زاد الضغط زادت درجة حرارة الغليان .

وتعرف كمية الحرارة اللازمه لرفع درجة حرارة الماء من درجة التجمد (الصفر المئوى أو ٣٢°ف) الى درجة الغليان بحرارة السائل الظاهرية Sensible or Liquid Heat واذا استمر التسخين بعد وصول الماء الى درجة حرارة الغليان نجد ان درجة حرارة الماء سوف لاتتغير وتظل ثابته تحت ضغط ثابت . ويكون نتيجة للحرارة المتصه ان يتحول الماء من الحالة السائله الى الحاله الغازيه بالتدريج وذلك تحت درجة حرارة وضغط ثابتين . وتعرف كمية الحرارة المتصه بالحراره الكامنه Latent Heat واذا استمرت عمليةالتسخين يتحول جميع الماء الى بخار مشبع وتعرف هذه الحالة بحالة التشبع Saturation وتساوي درجة حرارة الغليان درجة حرارة التشبع Saturation Temperature واذا استمرت عملية التسخين بعد ذلك تتسبب فى رفع درجة حرارة البخار تحت نفس الضغط وتعرف هذه العمليه بعملية التحميص Superheating.

ويتلخص مما سبق انه يوجد هناك ثلاثة انواع من البخار :-

١- <u>البخار الجاف والمشبع</u> : <u>Dry and Saturated Steam</u>

وهو البخار الذى تكون نتيجة تبخر الماء تبخيرا كاملا بحيث لايوجد به أى اثر لقطرات الماء العالقه اى انه بخار خال تماما من الرطوبه . ودرجة حرارته تكون هى نفس درجة حرارة التبخير او الغليان او التشبع .

٢- البخار الرطب : Wet Steam

وهو بخار ماء به قطرات ماء عالقه نتيجة لعدم تبخره تبخرا كاملا . وتكون درجة حرارته هى نفس درجة حرارة التبخير او الغليان او التشبع .

٣- البخار المحمص : Superheated Steam

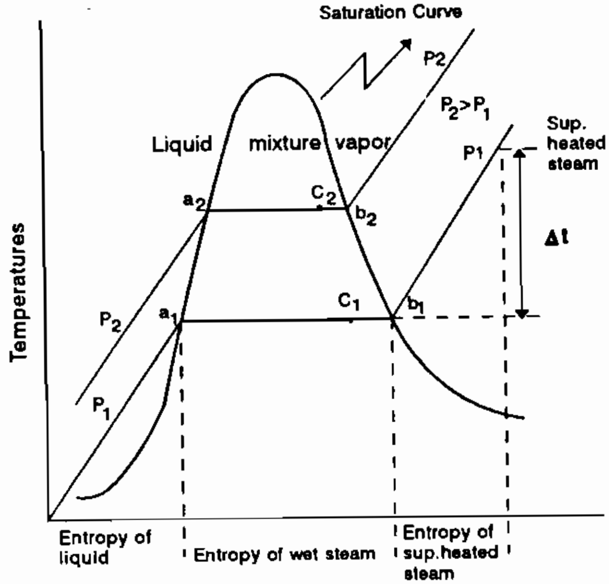
وهو بخار جاف ومشبع اكتسب درجة حرارة أكثر من حرارته الكامنه مما تسبب فى ارتفاع درجة حرارته عن درجة حرارة التبخير أو التشبع .

وكمية الحرارة الكامنه فى البخار عند ضغط ثابت تعتمد على نسبة الرطوبه الموجودة فيه اي على نسبة جفافه – وتعرف نسبة جفاف البخار او جودته (X)كالاتى :-

جودة البخار او نسبة جفاف البخار Dryness Fraction or Steam Quality

$$X = \frac{\text{Weight of dry steam}}{\text{Weight of wet steam mixture}} \qquad (8\text{-}1)$$

ويمثل الرسم البيانى الاتى (شكل ٨-١) العلاقه بين درجة الحرارة وانتروبيا البخار عند ضغوط مختلفه :-



شكل (٨-١) خريطة خصائص البخار

نقطة a_2 , a_1 يمثلان نقطة الغليان عند ضغط P_1 , P_2 على الترتيب
نقطة b_2 , b_1 يمثلان نقطة التشبع عند ضغط P_1 , P_2 على الترتيب
نقطة c_2 , c_1 يمثلان حالة بخار رطب عند ضغط P_1 , P_2 على الترتيب.

وتحسب الحرارة الكليه لوحدة وزنيه واحدة من البخار الرطب كالآتى:

$$i_{wet} = i' + XL \qquad (8\text{-}2)$$

والحراره الكليه فى وحدة وزنيه واحدة من البخار الجاف والمشبع

$$i_{D\&S} = i' + L \qquad (8\text{-}3)$$

والحراره الكلية لوحدة وزنيه واحدة من البخار المحمص

$$i_{S/H} = i' + L + Cp\,\Delta t \qquad (8\text{-}4)$$

حيث ان :

i_{wet} = الحراره الكلية لوحدة وزنيه من البخار الرطب
B.T.U/Lb. or k.cal./kg.

$i_{D\&S}$ = الحراره الكلية لوحدة وزنيه من البخار الجاف
B.T.U/Lb. or k.cal./kg.

$i_{S/H}$ = الحراره الكليه لوحدة وزنيه من البخار المحمص
B.T.U/Lb. or k.cal./kg.

i' = الحرارة الظاهريه للسائل لكل وحدة وزنيه
B.T.U/Lb. or k.cal./kg.

L = الحرارة الكامنه للبخار لكل وحدة وزنيه
B.T.U/Lb. or k.cal./kg

c_p = الحراره النوعيه للبخار تحت ضغط ثابت
B.T.U/Lb. ^oF or k.cal./kg. ^oC

= ٤٧ر. للبخار المحمص (كمتوسط عام).

X = جودة البخار الرطب او نسبة جفافه

Δt = درجات حرارة التحميص عند ضغط ثابت

= درجة حرارة البخار المحمص – درجة حرارة التشبع

استخدام جداول البخار :

المعلومات الموجودة فى جداول البخار كانت نتيجة لتجارب على بخار الماء الجاف ، عند درجات حرارة وضغوط مختلفه . وهذه النتائج محتسبه ابتداء من درجة حرارة الصفر المئوى او درجة ٣٢°ف على حسب ما اذا كانت الجداول تتبع الوحدات المتريه او الوحدات البريطانيه وتشتمل هذه النتائج على المعلومات الآتيه :-

درجة حرارة التشبع (درجة الغليان) ، الضغط المطلق للبخار،الحرارة الكليه للبخار الجاف والمشبع ، الحرارة الظاهريه للسائل ، الحرارة الكامنه للبخار الجاف . وجميع هذه المعلومات منسوبه الى وحدة وزنيه واحدة من البخار الجاف .

ويجب عند استخدام جداول البخار حساب الضغط المطلق وذلك باضافةالضغط الجوى الى الضغط المانومترى قبل البدء فى عمل اى حسابات على البخار كما يجب الاخذ فى الاعتبار درجة حرارة (أو كمية الحرارة) الموجود عندها الماء المستخدم فى توليد البخار وذلك بطرح كمية الحرارة الموجودة عندها من الحرارة الظاهريه للسائل والمقيدة فى جداول البخار .

كما تبين جداول البخار بعض البيانات الاخرى مثل الحجم النوعى للسائل وللبخار الجاف .

مثال :

ما هى كمية الحرارة الكلية اللازمه لتوليد ١٠ كجم من بخار رطب جودته ٩٠٪ وضغطه ٤ كجم/سم^{٢} اذا علمت ان الماء المستخدم فى توليد هذا البخار كان عند درجة حرارة قدرها ٤٣٫٦°م.

الحـــل

من جداول البخار يمكن الحصول على المعلومات الآتيه لبخار عند ضغط مطلق ٤ كجم/سم^2 .

$$\text{At} \quad P = 4 \ kg/cm^2$$

$$i' = 143.7 \ kcal/kg \ vapor$$

$$L = 510.2 \ kcal/kg \ vapor$$

$$t_{sat} = 142.92 \ ^oC$$

وحيث ان :

$$i_{wet} = i' + XL$$

اذا كان توليد البخار من ماء عند الصفر المئوى

$$\therefore i_{wet} = 143.7 - (1 \times 43.6) + (0.9 \times 510.2)$$

$$= 100.1 + 459.18 = 559.28 \ kcal/kg \ vapor$$

$$\therefore \text{Total heat} = 10 \times 559.28 = 5592.8 \ kcal.$$

الحجم النوعى للبخار الرطب :

الحجم النوعى هو عبارة عن حجم وحدة وزنيه واحدة من المادة . ويعتمد حجم وحدة وزنيه من البخار الجاف اعتمادا اساسيا على ضغط البخار ، ويمكن حسابها بدقه من التجارب العمليه المدونه فى جداول البخار .

فاذا كان الحجم النوعى للبخار الجاف عند ضغط P من جداول البخار يساوى V_s متر مكعب لكل كجم بخار جاف فتكون كثافة البخار الجاف $1/V_s$

فاذا فرض ان البخار رطب ونسبة جفافه (X) فان الحجم النوعى للبخار الرطب يكون :

$$V_{wet} = X V_s + (1 - X) V_w \qquad (8\text{-}5)$$

حيث ان :

V_S = الحجم النوعى للبخار الرطب المطلوب حسابه

V_W = الحجم النوعى للماء السائل الموجود فى جداول البخار

وعند الضغوط المنخفضه يكون حجم الماء صغير جدا اذا ماقورن بحجم البخار وعلى ذلك فانه يمكن اهمال حجم الماء فى المعادلة السابقة وينتج عن ذلك ان :

$$V_{wet} = XV_S \qquad (8\text{-}6)$$

<u>الحجم النوعي للبخار المحمص</u> :

يمكن حساب الجحم النوعى للبخار المحمص من القانون الآتي :

$$V_{S/H} = \frac{1.253\,(i_{S/H} - 835)}{P} \quad ft^3/Lb \qquad (8\text{-}7)$$

$$V_{S/H} = \frac{0.01\,(i_{S/H} - 464)}{P} \quad m^3/kg. \qquad (8\text{-}8)$$

وهناك طريقة تقريبيه لحساب الحجم النوعى للبخار المحمص باعتباره غاز مثالى يتبع القانون العام للغازات كالآتى :-

$$V_{S/H} = V_S \, \frac{T_{S/H}}{T_s} \qquad (8\text{-}9)$$

حيث $T_{S/H}$ = درجة الحرارة المطلقه للبخار المحمص

T_S = درجة حرارة التشبع المطلقـــــــه

خلط البخار

أولا : خلط البخار مع ماء :

ويمكن عمل الحسابات الخاصه بها وذلك بعمل موازنه حراريه ، قبل وبعد عملية الخلط ، أى ان الحرارة التى اكتسبها الماء نتيجة الخلط تساوي الحرارة التى فقدها البخار . فاذا فرض انه يراد خلط كمية من البخار مقدارها m_1 عند ضغط مطلق P_1 ونسبة جفاف البخار X_1 ، الى كمية من الماء مقدارها m_2 عند درجة حرارة T_2 ونتيجة لعملية الخلط فان البخار سوف يتكثف وتكون درجة حرارة المخلوط T_3 اقل من درجة حرارة التشبع للبخار T_1 .

$$\therefore\ m_1 \left[\left(i'_1 + X_1 L_1 \right) - i'_3 \right] = m_2 \left(i'_3 - i'_2 \right) \qquad (8\text{-}10)$$

ومن هذه المعادله يمكن حساب i'_3 ومن جداول البخار يمكن الحصول على درجة حرارة المخلوط T_3 المناظرة.

ثانيا : خلط بخار مع بخار عند ضغوط ودرجات حرارة مختلفه :

اذا فرض انه يوجد لدينا خزان به كمية من بخار m_1 عند ضغط P_1 ودرجة حرارة T_1 ونسبة جفافه X_1 . واضيفت الى هذا البخار كمية من بخار آخر وزنها m_2 عند ضغط P_2 ودرجة حرارة T_2 ونسبة جفاف X_2 ، والمطلوب معرفة درجة حرارة وضغط المخلوط . ويمكن حسابه على خطوتين :-

١- حجم الخزان ثابت

$$m_1\ X_1\ V_{s1} = (m_1 + m_2)\ X_3\ V_{s3} \qquad (8\text{-}11)$$

حيث X_3 هى نسبة جفاف مخلوط البخار .

٢- بعمل موازنه حراريه : الحرارة الكلية الموجوده فى كل نوع بخار على حده قبل عملية الخلط تساوي الحراره الكلية الموجودة فى البخار الناتج عن عملية الخلط .

$$m_1\ (i'_1 + X_1L_1) + m_2\ (i'_2 + X_2L_2) = (m_1 + m_2)\ (i_3 + X_3L_3) \quad (8\text{-}12)$$

وتحل المعادلتين السابقتين بطريقة الصواب والخطأ للوصول الى درجة الحرارة المطلوبه مع استخدام جداول البخار .

ثالثا: مخلوط من البخار والهواء :

ويستخدم فى هذه الحالة قانون دالتون للضغوط الجزئيه والتى سبق شرحها . فاذا اريد معرفة وزن الهواء الموجود فى مخلوط من البخار والهواء وفرض ان درجة حرارة المخلوط معلومه لدينا ، فتكون الخطوات كالآتى :-

١- انظر جداول البخار تحت درجة حرارة المخلوط ويكون الضغط المقابل هو الضغط الجزئى للبخار .

٢- يحسب الضغط الجزئى للهواء كالآتى :
الضغط الجزئى للهواء = الضغط الكلى للمخلوط - ضغط البخار الجزئى (المقابل لدرجة حرارة التشبع) .

٣- وزن الهواء فى المخلوط يمكن حسابه من القانون العام للغازات .

$$PV = m.R.T. \quad (8\text{-}13)$$

حيث :

P = الضغط الجزئى للهواء

m = وزن الهواء فى المخلوط

T = درجة حرارة المخلوط

القيزانات البخاريه : STEAM BOILERS

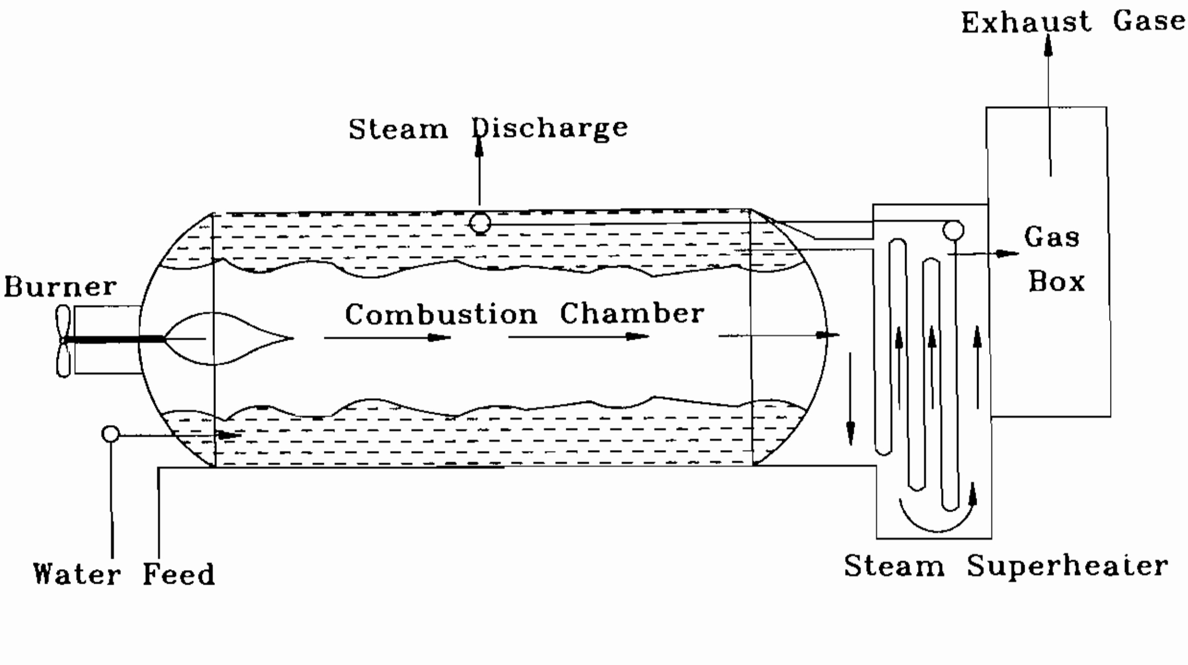
الغلايه او القيزان البخارى هى جهاز يستخدم فى توليد البخار تحت ضغط ثابت وتخزينه لاستعماله فى اغراض التسخين او فى توليد القوى المحركه .

ويتكون القيزان عادة من وعاء اسطوانى يسمى بالغلايه يحتفظ بالماء داخله لتوليد البخار منه وتخزينه تحت ضغط ثابت الى حين استخدامه ، وهذا الوعاء متصل بعدة مواسير افقيه أو رأسيه أو على ميل بغرض زيادة سطح التسخين المعرض للغازات الناتجه من احتراق الوقود داخل غرفة الاشتعال .

والقيزانات البخاريه يمكن تقسيمها عامة الى ثلاثة انواع رئيسيه :

١- القيزان الاسطوانى : Tank or Shell Boiler

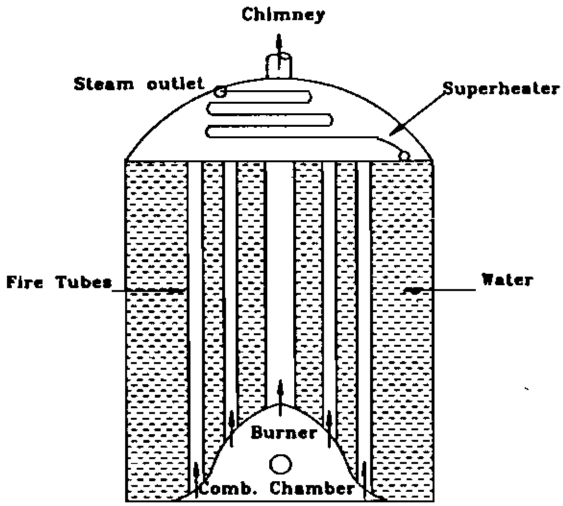
وهذا النوع من القيزانات يستخدم لتوليد كمية صغيرة من البخار لاغراض التسخين فى المصانع الصغيره ويتكون من اسطوانه تحتوى على ماسورة او عدة مواسير لزيادة سطح التسخين (شكل ٨-٢).



شكل (٨-٢) قطاع فى قيزان اسطوانى

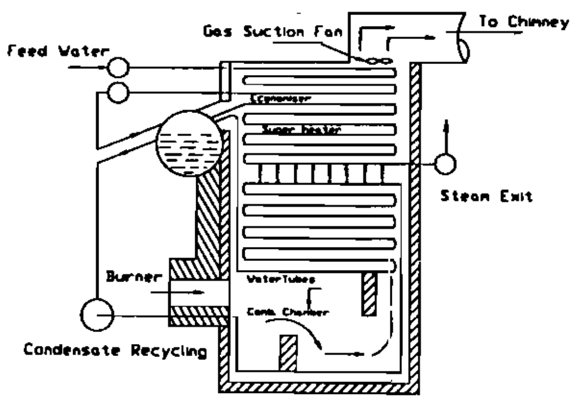
٢- القيزانات ذو انابيب اللهب : Fire-Tube Boiler

وهذا النوع من القيزانات (شكل ٨-٣) يتميز بان به عدة مواسير موصله من غرفة الاحتراق الى المدخنه حيث تمر الغازات الناتجه عن الاحتراق وتحيط بهذه المواسير المياه الذى يتولد منها البخار نتيجة لانتقال الحراره من الغازات الساخنه الى المياه خلال جدار المواسير .



شكل (٨-٣) قطاع فى قيزان أنابيب اللهب

٣- القيزان ذو انابيب المياه : Water-Tube Boiler

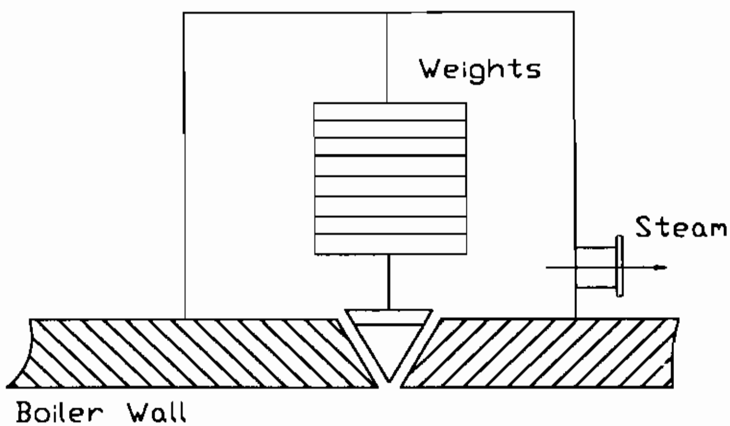


شكل (٨-٤) قطاع فى قيزان أنابيب المياه

وفى هذا النوع من القيزانات يمر الماء داخل شبكة من المواسير التى تعترض طريق مرور غازات الاحتراق الى المدخنه (شكل ٨-٤) . وهذا النوع يستخدم عادة لتوليد كمية كبيرة من البخار ويمكن استعماله فى التسخين او فى توليد القوى المحركه . ويمتاز هذا النوع بكفاءته العاليه فى تحويل كميات كبيرة من الماء الى بخار فى وقت قصير . وحتى يمكن زيادة كفاءة انتقال الحرارة من الغازات الناتجة عن الاحتراق تستخدم عادة مروحة لسحب هذه الغازات فتزيد من سرعة مرور الغازات على مواسير المياه ومواسير البخارالمحمص . ويمكن الاقتصاد فى كمية الوقود المستعمله باستخدام جزء من غازات الاحتراق فى تسخين مياه تغذية القيزان فى مبادل حرارى يسمى بالموفر Economizerوتستخدم طلمبة طاردة مركزيه فى ايجاد حركة مستمره للمياه داخل مواسير توليد البخار .

ولسلامة تشغيل القيزان ولكى يعمل بكفاءه عاليه يجب تزويده ببعض الاجزاء الاضافيه التى تعرف بمتممات القيزان وهى :

١- صمام الأمن Safty Valve

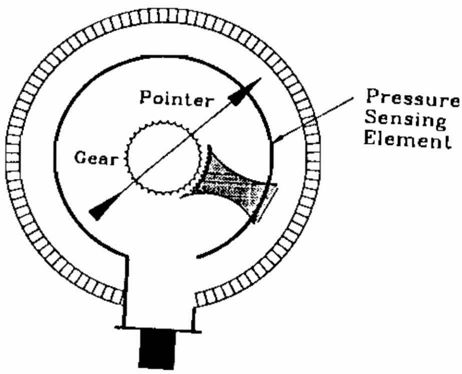


شكل (٨-٥) رسم مبسط لصمام أمن

وفائدته هو حفظ البخار داخل القيزان تحت ضغط معين ثابت بحيث اذا زاد الضغط عن حد معين يفتح الصمام حتى تتسرب كميه من البخار الى خارج القيزان (شكل ٨-٥) حتى لايؤدى ازدياد الضغط الى انفجار الغلايه . ويمكن كذلك بواسطة صمام الامن التحكم فى ضغط البخار وبذلك يمكن تنظيم درجة حرارة البخار اللازم فى

عمليات التسخين . ويظل صمام الامن مغلقا بواسطة ثقل متحرك فى طرف رافعه او عدة اثقال موضوعه مباشرة فوق الصمام ويوجد عادة صمامان لكل قيزان حتى اذا تعطل واحد يؤدى الآخر وظيفته .

٢- <u>مقياس الضغط</u> : <u>Pressure Gauge</u>

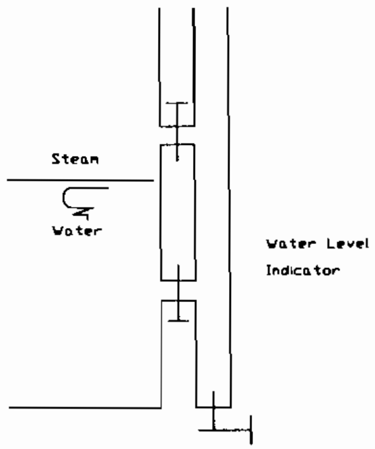


شكل (٨-٦) قطاع فى جهاز قياس ضغط البخار

يوضع مقياس الضغط فى الجزء العلوى من الغلايه ليكون متصلا بالبخار المتكون حيث انه يقرأ ضغط البخار . وقراءة المقياس تبين الضغط المانومترى للبخار اى انه يجب اضافة الضغط الجوى للقراءه لمعرفة الضغط المطلق للبخار . وهناك مقاييس للضغط يبدا تدريجها من الضغط الجوى لتعطى مباشرة الضغط المطلق .

ويتكون مقياس الضغط (شكل ٨-٦) من شريط من معدن خاص يتأثر بضغط البخار فيتمدد كلما زاد الضغط وينكمش كلما قل الضغط عليه . وهذا الشريط متصل بواسطة تروس بمؤشر يتحرك فى حركة دائريه على قرص به تدريج .

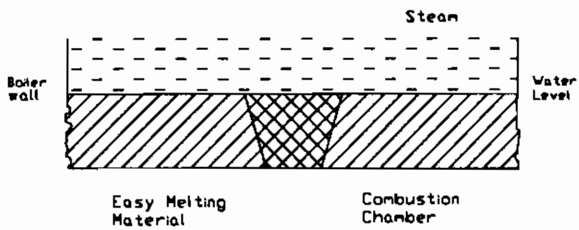
٣- زجاجة البيان : Water Level Indicator



شكل (٨-٧) زجاجة البيان

وتعمل بنظرية الاوانى المستطرقه وفائدتها بيان مستوى المياه فى وعاء القيزان وهى متصله بواسطة محابس بالجزء الذى يوجد به البخار والآخر بالجزء الذى يوجد به الماء (شكل ٨-٧) . وفى حالة ما اذا كسرت زجاجة البيان تقفل هذه المحابس حتى لايتسرب الماء والبخار خارج الغلايه . وكذلك تزود كل غلايه بزجاجتين للبيان حتى ما اذا كسرت واحدة يمكن استخدام الاخرى لبيان مستوى المياه .

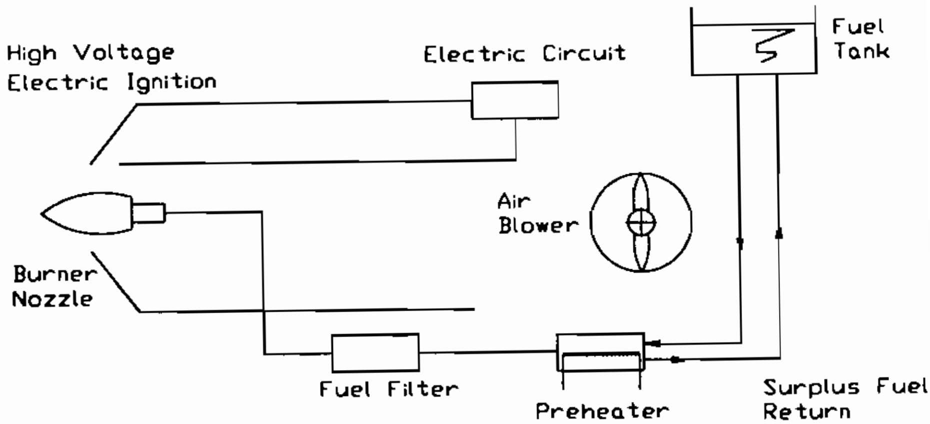
٤- مسمار الأمن Safty Pin



شكل (٨-٨) مسمار الأمن

وفائدته ضمان سلامة الغلايه فى حالة ما اذا انخفض مستوى الماء بها . ويوضع عادة فوق غرفة الاحتراق مباشرة وهو مصنوع من مادة سهلة الانصهار مثل الرصاص وطالما كان الماء يغطى طرف المسمار فى وعاء الغلايه فتكون درجة حرارة المسمار اقل من درجة انصهار معدنه حتى اذا انخفض مستوى الماء فى القيزان فيتعرض مسمار الامن (شكل ٨-٨) للحرارة الشديده الموجوده فى البخار زيادة على الحرارة التى يتعرض لها من الغازات الناتجة عن الاحتراق مما يسبب انصهاره واندفاع البخار الى بيت النار لاخماد الحريق متفاديا بذلك تعرض الغلايه للانفجار .

٥- جهاز اشعال الوقود (الولاعه): Fuel Burner

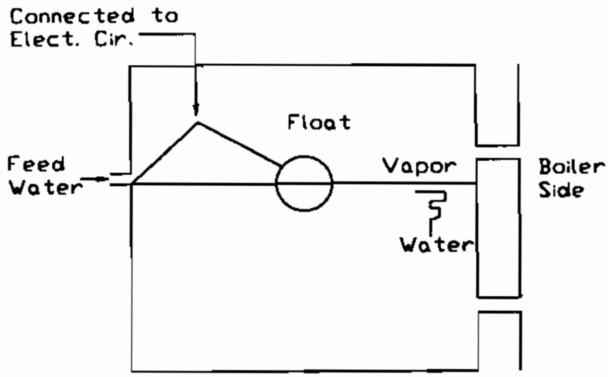


شكل (٨-٩) جهاز اشعال الوقود

هناك طرق متعددة لاشعال الوقود تعتمد اساسا على نوع وطبيعة الوقود فالقيزانات التى تستخدم الفحم تستعمل عادة سير حديدى ناقل يوزع الفحم على سطحه ثم يبدأ فى اشعال الفحم التى تنتقل منه الحرارة الى الشحنات التاليه . وفى مصانع شركة السكر بالجمهوريه تستعمل مصاصه القصب كوقود يتم احتراقه بواسطة اجهزة تلقيم وجنازير ناقله داخل غرفة احتراق القيزان .

ومعظم القيزانات التى تستخدم حاليا تستعمل الوقود السائل فى غرفة الاحتراق بواسطة الولاعه او جهاز الاشعال (شكل ٨-٩). وتتكون الولاعه من طلمبة ذات ازاحة ايجابيه (طلمبة ترسيه) لدفع الوقود الى الرشاش حيث يتحول الوقود السائل الى رزاز عند فوهة الرشاش (الفونيه) التى يوجد بها عدة ثقوب لتسهيل مهمة تفتيت السائل الى جزئيات دقيقه وتوجد مروحة مركبة على عامود موتور طلمبه الوقود ، فائدتها دفع الهواء داخل ماسورة الرشاش لتسهل عملية خلط الهواء برزاز الوقود الذى يشتعل عند حدوث شرارة كهربائية ذات جهد عال .

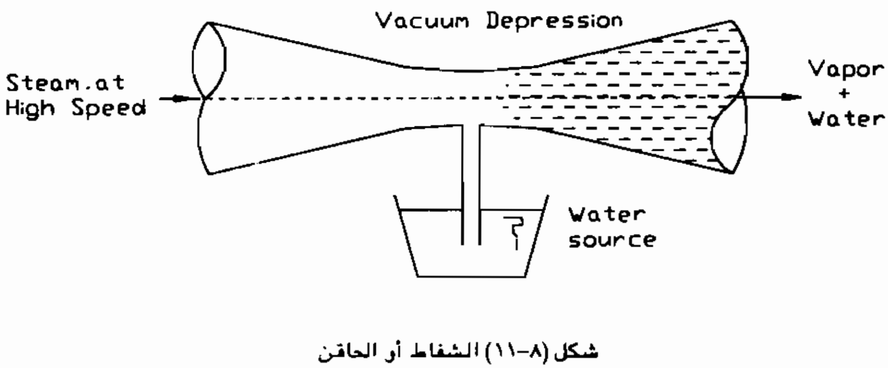
٦- العوامه : **Float Control**



شكل (٨-١٠) العوامه

وفائدتها تزويد الغلايه بالماء اللازم لتوليد البخار أتوماتيكيا عندما ينخفض مستوى الماء عن المنسوب اللازم . وتوجد العوامه فى صندوق متصل بفتحتين أحداهما للبخار والثانيه للماء فى وعاء الغلايه وتتصل رافعة العوامه بدائرة كهربائيه تقوم بتشغيل طلمبة تغذية الغلايه بالمياه وذلك فى حالة انخفاض مستوى الماء بها عن منسوب التشغيل .

٧- الشفاط او الحاقن : **Water Injector**



شكل (٨-١١) الشفاط أو الحاقن

ويستعمل عادة فى حالة توقف طلمبة المياه . وهو عبارة عن ماسورة بها اختناق يمرفيها البخار بسرعة عاليه (شكل ٨-١١) . وتتصل ماسورة المياه بعنق الاختناق الذى تحدث به منطقة ضغط منخفض (خلخلة) نتيجة لسرعة مرور البخار عند الاختناق ، ويتسبب عن ذلك سحب المياه الى داخل الماسوره ويمر مع البخار الى داخل الغلايه لملئها .

الحصان البخاري :

تقدر عادة قدرة الغلايه بالحصان البخارى Boiler Horse Power (Boiler H.P.) وهى ليس لها اى علاقه بالحصان الميكانيكى . ويعادل الحصان البخارى لغلاية كمية الحرارة اللازمه لتحويل ٣٤ر٥ رطل من الماء الى بخار فى الساعه الواحدة عند الضغط الجوى العادى (١٤ر٧ رطل/بوصه^{٢}) ودرجة حرارة ٢١٢^{o}ف . وقد اتخذت هذه الوحده على اساس انها كمية الحرارة التى تنتج من سطح تبادل حرارى بالغلايه قدره ١٠ قدم مربع فى مدة ساعه واحده .

والحرارة الكامنه لرطل واحد من البخار عند ضغط ١٤ر٧ رطل/البوصه المربعه ودرجة حرارة ٢١٢^{o}ف تساوى ٩٧٠ر٤ B.T.U/Lb .

$$\text{Boiler H.P} = 34.5 \times 970.4 = 33479 \text{ BTU}$$

وبالوحدات المتريه ، هى كمية الحرارة الناتجة من تحويل ١٥ر٦٥ كجم من الماء الى بخار فى الساعه الواحده عند الضغط الجوى العادى (١ر٠٣ كجم/سم^{٢}) ودرجة حرارة ١٠٠^{o}م على اساس انها كمية حرارة تنتج من سطح تبادل حرارى قدره متر مربع فى الساعه .

وبذلك يكون الحصان البخارى بالوحدات المتريه :

$$\text{Boiler H.P.} = 15.65 \times 539 = 8435.35 \quad \text{kcal.}$$

الباب التاسع

انتقال الحرارة : HEAT TRANSFER

تعتبر عملية انتقال الحرارة والتبادل الحرارى من العمليات ذات الاهمية الخاصة اذ ان غالبية عمليات التصنيع الغذائى تعتمد اعتمادا اساسيا على نقل الحرارة الى المواد المراد تصنيعها ، أى اجراء عمليات تسخين مثل بسترة الالبان وتعقيمها وتجفيف محاصيل الفاكهه والخضر او امتصاص الحرارة من المواد المراد تصنيعها ، أو اجراء عمليات تبريد مثل تجميد الاغذية وعمل الايس كريم وحفظ المواد المصنعه او الغير مصنعه مثل محاصيل الفاكهه والخضر تحت درجات حرارة منخفضة فى غرف تبريد خاصة تمهيدا لتداولها محليا أو تصديرها الى الخارج .

لذلك نجد انه من واجب مهندس الاغذيه الالمام الكامل والكافى بالاسس والمبادىء الخاصه بانتقال الحراره حتى يمكنه التحكم فى عمليات التصنيع والوصول بالمنتج الى الجردة المطلوبه للتسويق وهناك ثلاثة طرق رئيسية تنتقل بها الحرارة خلال جسم أو من جسم الى آخر وهى :

١- انتقال الحرارة بالتوصيل : Heat Conduction

وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لتلامس جزئيات المادة مع بعضها بدون تحركها. وتعتبر عملية رئيسية فى المواد الصلبة ، وثانوية فى المواد السائله ، وقليلة الاهميه فى الغازات .

٢- انتقال الحراره بالحمل : Heat Convection

وفيها تنتقل الحرارة من جسم ما الى سائل او غاز وذلك اثناء سريانه داخل مواسير او خارجها . وتتم عملية نقل الحرارة نتيجة لحركة جزئيات السوائل او الغازات .

٣- انتقال الحراره بالاشعاع : Heat Radiation

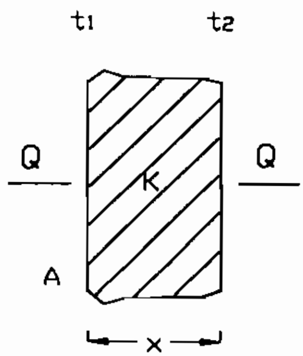
ويتم انتقال الحرارة بهذه الطريقه من اى جسم بدون وسيط وذلك نتيجة لاشعاع الحرارة من هذا الجسم على هيئة موجات كهرومغناطيسيه Electromagnetic Waves.

ومن الناحية العملية لايحدث انتقال للحرارة من نوع واحد فقط ، بل دائما نجد على الاقل اشتراك نوعين فى نقل الحراره وتسمى العمليه بانتقال الحرارة المختلط Combined Heat Transfer ويتوقف معدل انتقال الحرارة خلال جسم على عدة عوامل اهمها : الفرق بين درجات حرارة اسطح الجسم ، ومساحة سطح التبادل الحرارى العمودى على اتجاه انتقال الحراره ، ومقدرة الجسم على نقل الحراره او مدى مقاومة الجسم لانتقال الحرارة وعموما يعبر عنه بمعامل انتقال الحراره .

انتقال الحرارة بالتوصيل : HEAT CONDUCTION

اذا فرض انه يوجد لدينا جسم ما ، مثل حائط ذو سمك معين ، ودرجة حرارة سطحيه المتقابلين مختلفة ، نجد انه فى حالة الاستقرار الحرارى تنتقل كمية من الحرارة من السطح ذو درجة الحرارة المرتفعة خلال سمك الحائط الى السطح ذو درجة الحرارة المنخفضه (شكل ٩-١). وقد وجد عمليا ان معدل انتقال الحرارة خلال الحائط يتناسب تناسبا طرديا مباشرا مع الفرق فى درجة حرارة السطحين ومساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحراره . ويتناسب تناسبا عكسيا مع سمك الحائط المنتقله خلاله كمية الحرارة . ويعبر قانون فورير Fouriers Law عن العلاقة بين معدل انتقال الحرارة خلال الحائط والمتغيرات المذكورة كما يأتى :

$$Q = kA \frac{(t_1 - t_2)}{X} \qquad (9\text{-}1)$$



شكل (٩-١) انتقال الحرارة خلال حائط لانهائى

حيث ان :

Q = معدل انتقال الحرارة بالتوصيل BTU/hr or kcal./hr. or kW

k = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل بوحدات

BTU/hr. ft ^{o}F or kcal/hr. m. ^{o}C or W/m K

A = مساحة السطح العمودى على اتجاه انتقال الحرارة ft^2 or m^2

t_1 = درجة حرارة السطح الساخن للحائط ^{o}F or ^{o}C

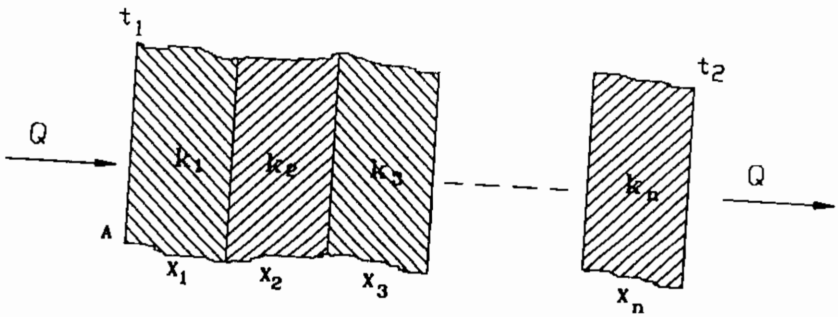
t_2 = درجة حرارة السطح البارد للحائط ^{o}F or ^{o}C

X = سمك الحائط ft or m

ويعبر المعامل " k " عن مدى مقاومة مادة الحائط لانتقال الحرارة ، فكلما زادت قيمته كلما كان الجسم موصلا جيدا لانتقال الحرارة ، وكلما قلت قيمته كلما كان الجسم ردىء التوصيل للحرارة اى عازل جيد للحراره

وعادة ما يتكون الجسم من اكثر من طبقة واحدة ، كما هى الحالة عند عزل جدران غرفة تبريد . فتمر كمية من حرارة الجو الخارجى للغرفة من طبقة مادة عازله ملاصقه لطبقة مونه اسمنتيه ثم طبقة الطوب الاحمر (مادة البناء) ثم طبقة مونة اسمنتيه أخرى ومنها خلال طبقة مادة عازله اخرى حتى تصل الى هواء الغرفه الداخلى .

ويمثل الشكل (٩-٢) طريقة انتقال الحراره خلال جسم مكون من عدة طبقات متوازيه .



شكل (٩-٢) انتقال الحرارة خلال حائط مركب من عدة طبقات

$$Q = \frac{A\ (t_1 - t_2)}{\frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3} + \dots\dots\dots \frac{X_n}{k_n}} \qquad (9\text{-}2)$$

حيث ان :

X_1 ، X_2 .... X_n هى سمك طبقات الحائط

k_1 ، k_2 .... k_n هى معامل انتقال الحرارة بالتوصيل المناظره .

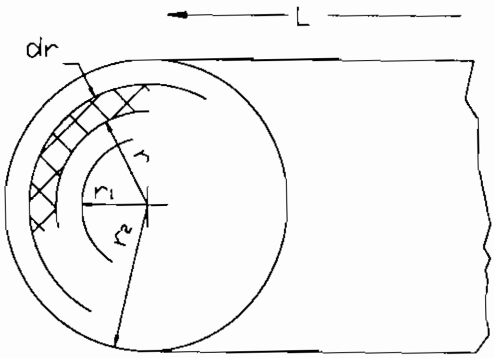
ويمكن تطبيق قانون فورير لانتقال الحراره بالتوصيل خلال سمك جدار جسم اسطوانى من الداخل الى الخارج ويسمى بانتقال الحرارة القطرى اى فى اتجاه القطر كما يأتى :

معدل انتقال الحراره التفاضلى للسريان القطرى = Q

$$Q = -kA \frac{dt}{dr} \qquad (9\text{-}3)$$

حيث أن

$\frac{dt}{dr}$ هو المعدل التفاضلى للتغير فى درجة الحرارة فى اتجاه القطر الاسطوانى.



شكل (٩-٣) انتقال الحرارة القطرى فى إسطوانه

حيث أن هذا المعدل متناقص فالاشارة السالبه موجودة لتصحح ذلك.

وقيمة A المساحه السطحيه للاسطوانه = $2\pi \; rL$

وباجراء عملية التكامل بعد التعويض عن قيمة A نحصل على :

$$Q = -2\pi r \; kL \frac{dt}{dr} \qquad (9\text{-}4)$$

$$\therefore -\frac{Q}{2\pi kL}\int_{r_1}^{r_2} \frac{dr}{r} = \int_{t_1}^{t_2} dt \qquad (9\text{-}5)$$

$$\frac{Q}{2\pi kL} \ln \frac{r_2}{r_1} = -\left[t\right]_{t_1}^{t_2} \qquad (9\text{-}6)$$

$$Q = \frac{2\pi kL\ (t_1 - t_2)}{\ln\ r_2 / r_1} \qquad (9\text{-}7)$$

or

$$Q = \frac{2\pi kL\ (t_1 - t_2)}{\ln D_2 / D_1} \qquad (9\text{-}8)$$

حيث أن :

L = طول الاسطوانه.

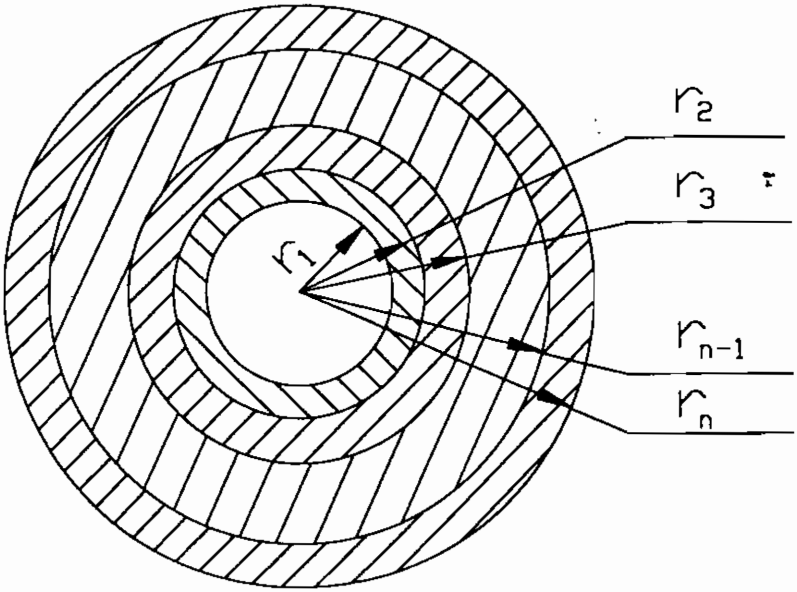
D_1 = قطر الاسطوانه الداخلي.

D_2 = قطر الاسطوانه الخارجي.

π = النسبه التقريبيه $\frac{٢٢}{٧}$

ln = لوغاريتم العدد للاساس الطبيعي وليس للاساس ١٠.

ومن الناحيه العمليه ، تكون الاسطوانه مغطاه باكثر من طبقة كما هي الحالة عند توصيل ماسورة بخار من موقع القيزان الى معدات التصنيع حيث تعزل ماسورة البخار بطبقة او اكثر من مواد عازلة للحرارة ويمكن حساب معدل انتقال الحراره كما يأتي:-



شكل (٩-٤) انتقال الحراره القطرى فى طبقات اسطوانيه

$$Q = \frac{2\pi L\ (t_1 - t_2)}{\frac{\ln D_2/D_1}{k_1} + \frac{\ln D_3/D_2}{k_2} + \dots\dots \frac{\ln D_n/D_{n-1}}{k_{n-1}}} \qquad (9\text{-}9)$$

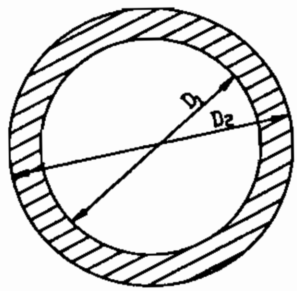
حيث أن :

D_1 = قطر الاسطوانه الداخلى

D_2 ، D_3 ، $D_n ....D_4$ = اقطار طبقات المواد الخارجيه المغلفة للاسطوانه

k_1 = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لمادة الاسطوانه

k_2 ، k_{n-1} = معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقات المواد الخارجيه المغلفه للاسطوانه.



شكل (٩-٥) انتقال الحرارة القطرى فى طبقات كرويه

أما اذا كان انتقال الحراره يتم من داخل الى خارج (او العكس) جسم كروى الشكل كما هى الحاله عند تبريد البطيخ مثلا داخل غرفة تبريد فيمكن حساب معدل انتقال الحراره كما يأتى :

$$Q = \frac{2\pi k\ (t_1 - t_2)}{\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2}} \qquad (9\text{-}10)$$

حيث ان :

D_1 = قطر الكره حتى السطح الداخلى للجسم .

D_2 = قطر الكره حتى السطح الخارجى للجسم .

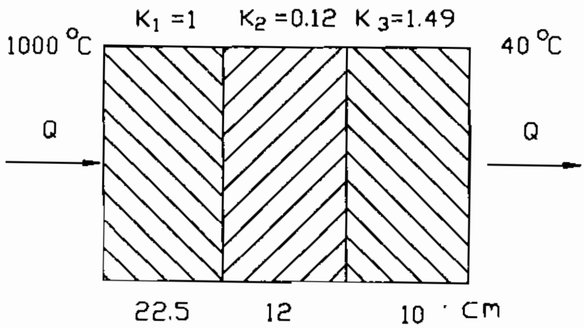
يوجد بالملاحق (ملحق رقم ٢) جداول تبين قيم معامل انتقال الحراره بالتوصيل لبعض المعادن وسبائكها وكذلك لبعض المواد العازلة الشائعة الاستعمال فى عمليات التسخين والتبريد داخل مصانع الاغذيه والالبان بالوحدات الدوليه.

مثال : احسب معدل الفقد فى الحراره من حائط فرن مكون من ثلاثة طبقات كالاتى:

٥ر٢٢ سم طوب حرارى ذو معامل انتقال حراره بالتوصيل ٠ر١ وات/متركلفن
١٢سم مادة عازله ذو معامل توصيل للحراره مقداره ١٢ر٠ وات/متركلفن
١٠ سم من طوب احمر ذو معامل توصيل للحراره مقداره ٤٩ر١ وات/متر كلفن

وذلك اذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى ١٠٠٠°م ، ٤٠°م على الترتيب.

الحل



$$Q = \frac{A\ (t_1 - t_2)}{\frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3}}$$

$$Q = \frac{(1000 - 40)\ X\ 1}{\frac{22.5}{(100)\ (1)} + \frac{12}{(100)\ (0.12)} + \frac{10}{(100)\ (1.49)}}$$

$= 745 \quad Watt/m^2$

انتقال الحرارة بالحمل : HEAT CONVECTION

اذا فرض انه يوجد لدينا جسم معدني ساخن ، ويوجد على اسطحه سائل او غاز سواء فى حالة سكون او حركة مستمره ، نجد انه تنتقل كمية من الحرارة من الجسم الى السائل او الغاز نتيجة لملامستها لسطح التبادل الحرارى . ويلاحظ انه اذا تحرك السائل او الغاز على سطح التبادل الحرارى تتكون طبقة ذات سمك صغير جدا من السائل او الغاز تكون ملاصقه لهذا السطح تسمى بالطبقة الحديه او Boundary Layer ويتم انتقال الحراره خلالها من الجسم المعدنى الى بقية السائل او الغاز . ويزداد معدل انتقال الحرارة كلما قل سمك هذه الطبقه . ويتم انتقال الحرارة فى حالة سكون السائل او الغاز على السطح الساخن نتيجة للفرق فى كثافة الطبقة الملامسه للسطح الساخن . فمن المعلوم ان هذه الطبقه تكون درجة حرارتها مرتفعه نوعا ما عن بقية السائل او الغاز مما يتسبب عنه انخفاض فى كثافتها فترتفع الى اعلى ويحل محلها طبقة اخرى ذات درجة حرارة منخفضه وتتوالى هذه العملية محدثة حركة فى السائل او الغاز تسمى بتيارات الحمل ويسمى هذا النوع من انتقال الحرارة بالحمل الحر Free Convection . أما فى حالة حركة السائل او الغاز نتيجة لدفعها بواسطة طلمبه أو مروحة على سطح التبادل الحرارى فيسمى انتقال الحراره بالحمل الجبرى Forced Convection وفى كلا الحالتين فانه يمكن استخدام قانون نيوتن للتبريد او التسخين Newton's Law of Cooling or Heating لحساب كمية الحرارة المنتقله الى السائل او الغاز فى وحدة الزمن كما يأتى :

$$Q = h A (t_2 - t_1) \qquad (9-11)$$

حيث أن :

t_2 = درجة حرارة سطح التبادل الحرارى ^oF or ^oC

t_1 = درجة حرارة السائل او الغـــــاز ^oF or ^oC

A = مساحة سطح التبادل الحـــرارى ft^2 or m^2

h = معامل انتقال الحراره بالحمل

$BTU/hr.\ ft^2\ ^oF$ or $kcal/hr.m^2\ ^oC$ or $Watt/m^2\ K$

وبخلاف الحالة فى ان معامل انتقال الحراره بالتوصيل " k" كمية ثابته لكل مادة تختلف من مادة الى اخرى وتدل على مدى مقاومتها لانتقال الحرارة نجد ان معامل انتقال الحراره بالحمل "h" يختلف اختلافا جذريا بالنسبه للسائل او الغاز نفسه وذلك تبعا للظروف التى تتحكم فى سريان السوائل والغازات التى تعتمد على مايأتى :

١- سرعة سريان السائل او الغاز على سطح التبادل الحرارى .
٢- نوع السريان على الاسطح.
٣- كثافة السريان او الغاز.
٤- لزوجة السائل او الغاز.
٥- حرارته النوعية.
٦- درجة حرارة سطح التبادل الحرارى .
٧- طول السطح او قطره فى حالة الاسطح المستديره .

سريان السوائل والغازات على الاسطح او داخل مواسير :

سواء كان سريان السوائل او الغازات سريانا حرا او جبريا (قسريا) فنجد انه اما ان يسير فى خطوط متوازيه او انسيابيه Streamline or Laminar Flow او فى المرحلة الانتقالية Transition Flow كخليط من الخطوط المتوازيه والمضطربه ، او يسير فى حالة دوامية مضطربه Turbulent Flow وتؤثر طريقة سريان السوائل او الغازات على قيمة معامل انتقال الحرارة بالحمل "h" .

وتتحدد طريقة سريان السائل او الغاز بمعرفة قيمة رقم رينولدز Reynolds Number اذا كانت قيمته اقل من ٢١٠٠ كان سريان السائل او الغاز من النوع الانسيابى المتوازى واذا زادت عن ٤٠٠٠ دل ذلك على ان السريان من النوع الدوامى المضطرب والسابق الاشاره اليها فى الباب الخاص بسريان الموائع ونعيد فيما يلى كتابة المعادله الخاصه برقم رينولدز Re.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \qquad (9\text{-}12)$$

حيث ان :

V	=	سرعة سريان السائل او الغاز	ft/sec. or m./sec.
ρ	=	كثافة السائل او الغاز	Lb/ft^3 or $kg./m^3$
D	=	الطول المميز لسطح السريان	ft. or m.
μ	=	لزوجة السائل او الغاز	Lb/ft. sec. or kg./m.sec.

مع مراعاة ان خواص السائل او الغاز الطبيعيه يجب حسابها عند درجة الحرارة المتوسطة له وفى حالة ما اذا كان السريان داخل مواسير فيكون D هو قطر الماسوره الواحدة ، واذا كان السريان على اسطح فيكون D هو طول السطح ، اما اذا كان السريان داخل مواسير مقطعها غير دائرى (مربع او مستطيل مثلا) فان D فى

هذه الحالة تمثل مايسمى بالقطر الهيدروليكى لمقطع مجرى السريان ويمكن حسابه كما ذكر سابقا فى الباب الخاص بسريان الموائع

<u>الحالات المختلفه لانتقال الحرارة بالحمل وطريقة ايجاد المعامل "h".</u>

قبل ان نذكر فيما بعد الحالات المختلفه لانتقال الحرارة بالحمل فانه يجب معرفة رقم أخر يسمى رقم براندل Prandtl Number وهو رقم غير مميز (لابعدى)يحدد مدى مقارنة توزيع درجة حرارة سائل او غاز داخل مجرى اثناء تسخينه او تبريده وتغيرها مع سرعة سريانه داخل هذا المجرى .

ويرمز لرقم براندل بالرمز "Pr" وتتحدد قيمته من المعادله الآتيه :

$$Pr = \frac{\mu \; C_p}{k} \tag{9-13}$$

حيث ان :

μ = لزوجة السائل او الغاز kg/m.sec. or Lb/ft.sec.

C_p = الحرارة النوعية تحت ضغط ثابت BTU/Lb. ^{o}F

or kcal/kg.^{o}C or kJ/kg K

k = معامل انتقال الحراره بالتوصيل BTU/sec. ft.^{o}F

or kcal/sec.m.^{o}C or kW/m K

<u>اولا</u> : <u>السريان الجبرى أو القسري</u> <u>Forced Convection</u>

أ- إذا كان السريان دوامى مضطرب أى أن $Re > 4000$

وكان رقم $Pr < 10$ تستخدم المعادلة الآتيه :

$$Nu = \frac{hD}{k} = 0.023 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.4} \tag{9-14}$$

ب- اذا كان السريان دوامى مضطرب وكان $P_r > 10$ وتستخدم المعادلة الآتيه :

$$\frac{hD}{k} = 0.027 \times Re^{0.8} \times Pr^{0.3} \tag{9-15}$$

ج- اذا كان السريان انسيابى متوازى أى أن $Re < 2100$ تستخدم المعادله الآتيه :

$$\frac{hD}{k} = 0.664 \times Re^{0.5} \times Pr^{0.33} \qquad (9-16)$$

ثانيا : السريان الحر Free Convection

وقبل أن نذكر بعض المعادلات التى تعبر عن قيمة معامل إنتقال الحرارة بالحمل h فإنه من المناسب أن نعرف رقم أخر غير مميز يسمى رقم جراشوف Grashof's .

ويرمزله بالرمز Gr وهو يعبر عن النسبه بين القوى المتولدة عن تيارات الحمل Buoyant forces والقوى المتولدة عن احتكاك طبقات المائع مع بعضها أى لزوجتها Viscous forces

$$Gr = \frac{\rho^2 g_c . \beta \Delta t . L^3}{\mu^2} \qquad (9-17)$$

حيث ان :

ρ = كثافة المائع

g_c = عجلة الجاذبيه الأرضيه

β = معامل التمدد ويعبر عنه بمقلوب درجة الحرارة المطلقه للمائع

Δt = الفرق بين درجة حرارة السطح الساخن ودرجة الحرارة المتوسطة للمائع

L = الطول المميز للسطح

μ = لزوجة المائع محسوبه عند درجة الحرارة المتوسطة له

مع ملاحظة وحدات كل عامل من هذه العوامل والتى يمكن التعويض بها فى رقم Grashof بحيث ينتج عنه رقم غير مميز (لابعدى Dimensionless)

أ- فى حالة السوائل يمكن استخراج قيمة h من المعادلات الآتيه :

$$Nu = 0.53\ (Gr.\ Pr.)^{0.25} \qquad (9\text{-}18)$$

$$\frac{hD}{k} = 0.53 \left[\frac{\rho^{2} gc.\beta\ \Delta t.D^{3}}{\mu^{2}} \cdot \frac{\mu cp}{k}\right]^{0.25} \qquad (9\text{-}19)$$

$$= 0.53 \left[\frac{\rho^{2}\ gc.\ \beta.\ \Delta t.D^{3}.\ cp}{\mu\, k}\right]^{0.25} \qquad (9\text{-}20)$$

وذلك فى حالة ما إذا كان قيمة

$$Gr.\ Pr. < 10^{9}$$

وتستخدم المعادلة الآتيه :

$$Nu = 0.12\ [Gr.\ Pr.]^{0.33} \qquad (9\text{-}21)$$

$$\frac{hD}{k} = 0.12 \left[\frac{gc.\ D^{3}\ \rho^{2}.\ cp.\ \beta.\ \Delta t.}{\mu.\ k}\right]^{0.33} \qquad (9\text{-}22)$$

وذلك اذا كان $Gr.\ Pr. > 10^{9}$

ب- فى حالة الغازات يمكن استخراج قيمة "h" من المعادلات الآتيه :

١- مواسير افقيه أو رأسيه لايزيد طولها عن قدم أو ٣٠ سم

$$h = 0.27 \left(\frac{\Delta t}{D}\right)^{0.25} \qquad (9\text{-}23)$$

فى حالة الأسطح تستخدم " L " بدلا من "D"

٢- أسطح أفقيه ساخنه من أعلى

$$h = 0.38\ \ \Delta t^{0.25} \qquad (9\text{-}24)$$

٣- أسطح أفقيه ساخنه من أسفل

$$h = 0.20 \ \Delta t^{0.25} \quad (9\text{-}25)$$

٤- أسطح أو مواسير رأسيه طولها أكبر من قدم أو ٣٠ سم

$$h = 0.27 \ \Delta t^{0.25} \quad (9\text{-}26)$$

<u>**مثال**</u> :

أوجد معامل انتقال الحراره بالحمل عند تسخين عصير طماطم من ١٦°م إلى ٧٦°م اذا كانت سرعة سريان العصير ٢٥ر١ متر/ثانيه خلال ماسورة قطرها الداخلى ٥ر٢ سم وكانت درجة حرارة سطح الماسورة من الخارج ٨٢°م وكثافة العصير ١٠٢٥ كجم/متر مكعب وحرارته النوعيه ٩٥ر٠ ولزوجته المتوسطه ٤ر٨ كجم/ساعه.متر ومعامل إنتقال الحراره بالتوصيل ٥٢ر٠ وات/متر°كلفن .

<u>**الحل**</u>

نحدد أولا نوع السريان وعلى ذلك نحسب رقم رينولدز

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu}$$

$$= \frac{(1025)(1.25 \ X \ 60 \ X \ 60) \ (2.5)}{(8.4) \qquad\qquad (100)}$$

$$= 13727.7 \qquad (\text{i:e}) \quad >2100$$

∴ السريان دوامى مضطرب

$$Pr = \frac{\mu \ C_p}{k}$$

$$= \frac{(8.4) \ (0.95)}{(0.57)} = 15.35$$

وعلى ذلك نستخدم المعادلة ب- بند أولا حيث أن $Pr > 10$

$$\frac{hD}{k} = 0.027 \quad Re^{0.8} \quad Pr.^{0.3}$$

$$\frac{h \times 2.5}{0.52 \times 100} = 0.027 \quad (13727.7)^{0.8} \quad (15.35)^{0.3}$$

$$\therefore h = \frac{(0.027) \; (2042.1) \; (2.27) \; (0.52) \; (100)}{(2.5)}$$

$$= 2603 \qquad W/m^2 .K$$

انتقال الحرارة بالاشعاع
HEAT RADIATION

ويتم انتقال الحرارة عن طريق اشعاع جزئيات الجسم ، سواء كان سائل او غاز او مادة صلبه ، بين بعضها وكذلك يتبادل هذه الاشعاعات بين جزئيات مواد مختلفه وتحمل هذه الاشعاعات طاقه حراريه تنتقل على شكل موجات كهرومغناطيسيه Electromagnetic سرعتها تساوى سرعة الضوء تعتمد اساسا على درجة حرارة الجسم المشع وطبيعة سطحه . وقد وجد نظريا وعمليا ان معدل انتقال الحراره بالاشعاع يتناسب تناسبا طرديا مع مساحة السطح المشع والأس الرابع لدرجة حرارته المطلقه ويعبر عن هذه العلاقه قانون ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann كما يأتى :

$$Q = \sigma A T^4 \qquad (9\text{-}27)$$

حيث ان :

A = مساحة السطح المشع
T = درجة الحرارة المطلقه للسطح المشع
σ = ثابت ستيفان - بولتسمان Stefan-Boltzmann Constant
= ١٧٢ر٠ × ١٠^-٨ BTU/hr. ft^2 ^{o}F^4
= ٩٦ر٤ × ١٠^-٨ kcal/hr. m^2. ^{o}C^4
= ٦٦٩ر٥ × ١٠^-٨ W/m^2.K^4

والقانون السابق يفترض ان الجسم يشع جميع طاقته الحراريه بدون ان يؤخذ فى الاعتبار طبيعة السطح المشع سواء كان املسا او خشنا .وعلى ذلك يجب تصحيح هذه المعادلة بمقدار ما يشعه الجسم حقيقة . فاذا كانت e هى نسبة الاشعاع للجسم اى النسبه بين مقدار مايشعه الجسم من طاقة حراريه الى الطاقه الحراريه الاشعاعيه الكليه لهذا الجسم ، اى ان هذه النسبه يجب ان تكون اقل من الواحد الصحيح . فتصير المعادلة السابقه (٩-٢٧) :

$$Q = \sigma\, e\, A\, T^4 \qquad (9\text{-}28)$$

فاذا فرض انه يوجد هناك جسمان مشعان فى حيز لايؤثر على طريقة اشعاعهما ، فان كمية الحرارة المتبادله بينهما بالاشعاع تعتمد بالاضافه الى ماسبق على كيفية وضع هذان الجسمان بالنسبه لبعضهما حيث ان جميع الطاقه المشعه من كل جسم لاتقطع سطح الجسم الأخر . ففى حالة وجود جسم ساخن فى حيز محدود - مثل اسطوانه ذات قطر صغير موضوعه مركزيا داخل اسطوانه اخرى ذات - قطر كبير وسطحيهما متوازيان ، او مثل سطحى كرتين متوازيين مركزيا فان كمية الحرارة المتبادلة بالاشعاع بينهما تكون :

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{A_1}{A_2}\left(\frac{1}{e_2} - 1\right)} \qquad (9\text{-}29)$$

حيث ان :

A_1 = مساحة السطح المشع

A_2 = مساحة سطح الحيز المحدود المحيط بالجسم المشع

T_1 = درجة الحرارة المطلقه للجسم المشع

T_2 = درجة الحرارة المطلقه للحيز المحيط

e_1 = نسبة اشعاع الجسم المشع

e_2 = نسبة اشعاع الحيز المحيط

فاذا كان الحيز كبير جدا بالنسبه للسطح المشع ، كما هى الحالة عند وجود ماسورة بخار تمر داخل حجرة كبيره مثلا ، فانه يمكن اهمال مساحة السطح المشع A_1 اذا ماقورنت بمساحة الحيز A_2 وبذلك تصبح المعادلة السابقه معادلة رقم (٩-٢٩) كما يأتى :

$$Q = \sigma\, e_1\, A_1 \quad (T_1^4 - T_2^4) \qquad (9\text{-}30)$$

وفى حالة تبادل الاشعاع الحرارى بين سطحين مستقيمين متوازيين اى ان :

$A_2 = A_1$ فان كمية الحرارة المتبادله بينهما تصير :

$$Q = \frac{\sigma A_1 (T_1^4 - T_2^4)}{\frac{1}{e_1} + \frac{1}{e_2} - 1} \qquad (9\text{-}31)$$

وفى كثير من الاحيان يمكن تبسيط حساب كمية الحرارة المتبادلة بالاشعاع باستخدم معامل انتقال الحرارة بالاشعاع يشابه الحالة لانتقال الحراره بالحمل . ويمكن توضيح ذلك باستخدام مثلا الحالة التى يكون فيها الحيز كبير جدا بالنسبه للسطح المشع كما يأتى :

$$Q = h_r A (T_1 - T_2) \qquad (9\text{-}32)$$

$$= \sigma e A (T_1^4 - T_2^4) \qquad (9\text{-}33)$$

حيث h_r = معامل انتقال الحرارة بالاشعاع

$$\therefore h_r = A e \sigma \frac{(T_1 + T_2)^3}{2} \left[1 + \left(\frac{T_1 - T_2}{T_1 + T_2} \right)^2 \right] \qquad (9\text{-}34)$$

$$= 0.00692 \quad e \left(\frac{T_{av.}}{100} \right)^3 \qquad (9\text{-}35)$$

حيث

T_{av} = درجة الحرارة المطلقة المتوسطة = $\frac{T_1 + T_2}{2}$

انتقال الحرارة المختلط
COMBINED HEAT TRANSFER

من الناحيه العمليه ، لايحدث ان تتبادل المواد كمية حرارة من نوع واحد فقط، ودائما نجد ان كمية الحراره تنتقل بالتوصيل مع انتقال بالحمل ، او انتقال بالحمل مع انتقال بالاشعاع او انتقال بالثلاثه انواع معا . ويعبر عن ذلك استخدام معامل كلى مكافىء للتبادل الحرارى ، وتكون بذلك كمية الحراره المنتقله فى وحدة الزمن :

$$Q = UA\ (T_1 - T_2) \tag{9-36}$$

حيث ان :

T_1 = درجة الحرارة الخارجية للسطح الاول

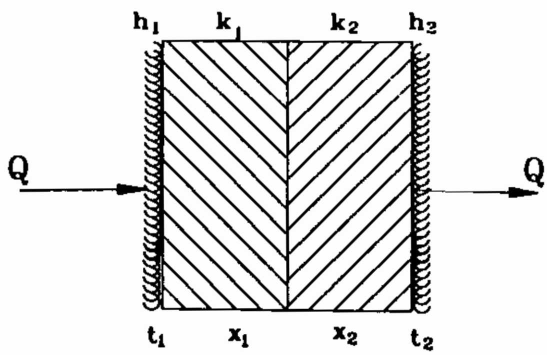
T_2 = درجة الحراره الخارجية للسطح الثانى

A = مساحة سطح التبادل الحرارى المتعامد مع اتجاه انتقال الحرارة .

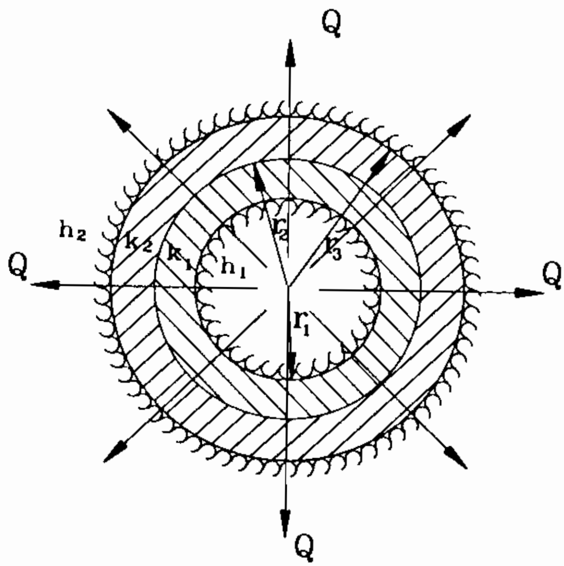
U = المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحراره .

ففى حالة التبادل الحرارى المختلط بالتوصيل والحمل لحائط مكون من طبقتين شكل (٩-٦) يكون المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى .

$$\frac{1}{U} = \frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{1}{h_2} \tag{9-37}$$



شكل (٩-٦) انتقال الحرارة المختلط فى حائط مركب



شكل (٩-٧) انتقال الحرارة المختلط فى طبقات اسطوانيه

وفى حالة انتقال الحراره القطرى لاسطوانتين مركزيتين متوازيتين :

$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi k_1 L} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{2\pi k_2 L} \ln \frac{D_3}{D_2} + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (9\text{-}38)$$

حيث أن :

D_1 = القطر الداخلى للاسطوانه الداخليه .

D_2 = القطر الخارجى للاسطوانه الداخليه.

D_3 = القطر الخارجى للاسطوانه الخارجيه

k_1 = معامل انتقال الحراره بالتوصيل لجدار الاسطوانه الداخليه .

k_2 = معامل انتقال الحراره بالتوصيل لجدار الاسطوانه الخارجيه .

A_1 = المساحه السطحيه الداخليه للاسطوانه الداخليه $\pi D_1 L$

A_2 = المساحه السطحيه الخارجيه للاسطوانه الخارجيه $\pi D_3 L$

L = طول الاسطوانه.

h_1 = معامل انتقال الحرارة بالحمل على سطح الاسطوانه الداخليه.

h_2 = معامل انتقال الحراره بالحمل على السطح الخارجى للاسطوانه الخارجيه .

وفى حالة وجود كرتين مركزيتين يمكن حساب المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى من :

$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi k_1}\left(\frac{1}{D_1} - \frac{1}{D_2}\right) + \frac{1}{2\pi k_2}\left(\frac{1}{D_2} - \frac{1}{D_3}\right) + \frac{1}{h_2 A_2} \quad (9\text{-}39)$$

حيث :

$$A_1 = \pi D_1^2$$

$$A_2 = \pi D_2^2$$

المبادلات الحرارية
HEAT EXCHANGERS

يتم نقل الحراره من والى المواد المراد تصنيعها بواسطة معدات خاصة تسمى بالمبادلات الحراريه . ولكى نتفهم هذه الاجهزة بانواعها واشكالها المختلفة يجب دراسة طريقة انتقال الحرارة داخل هذه الاجهزة والالمام الكافى بمدى صلاحيتها للاستعمال فى مختلف عمليات التصنيع . وحتى نضمن الانتقال السريع للحرارة بكفاءة عاليه وباقل فقد ممكن للحرارة ، نذكر فيما يأتى القواعد الاساسية التى يجب مراعاتها فى جميع عمليات التبادل الحرارى :

١- التجديد السريع لطبقة السائل الملامسه لسطح التبادل الحرارى .

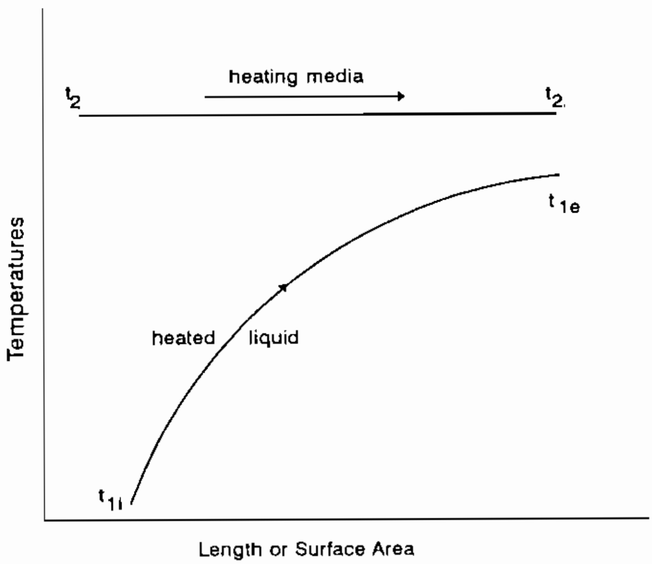
٢- خلط الطبقات الملامسه مع باقى طبقات السائل وتجديدها بطبقة اخرى مع الاخذ فى الاعتبار المنتجات والسوائل التى تتلف نتيجة للخلط الشديد .

٣- العمل على ايجاد اكبر فرق ممكن فى درجات الحراره بين المادة المراد تسخينها او تبريدها وبين وسيط التسخين او التبريد ولكن مع مراعاة انواع الاغذية والمنتجات الزراعيه التى لاتتحمل فرق كبير فى درجة الحرارة كالالبان التى يحدث لها ظاهرة الشياط اذا زاد هذا الفرق بمقدار كبير .

٤- استعمال اسطح جيدة التوصيل للحراره .

الطرق الرئيسية للتبادل الحرارى

١- التبادل الحراري ذو الوسيط الثابت : Constant Flow



شكل (٩-٨) المبادل الحرارى ذو الوسيط الثابت

وفى هذه الحالة يكون الوسيط الحرارى ذو درجة حرارة ثابته مثل البخار وتنتقل الحرارة الكامنه منه الى السائل المراد تسخينه فلا تنخفض درجة حرارته اى يتم تكثيفه فيتحول البخار من حالة التشبع مثلا الى حالة ماء عند درجة حرارة الغليان لضغط البخار المناظر .

ويعمل موازنة حراريه داخل المبادل الحرارى بغرض اهمال أى فقد للحرارة منه الى الجو المحيط به ، نجد ان :

كمية الحرارة المنتقله من البخار = كمية الحرارة الممتصه بواسطة السائل المراد تسخينه .

$$Q=m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e}) \qquad (9\text{-}40)$$

$$Q=m_2 \text{ (Total heat of steam - liquid heat)} \qquad (9\text{-}41)$$

حيث أن :

m_1 = معدل سريان السائل المراد تسخينه

m_2 = معدل سريان بخار التسخين

C_{p1} = الحرارة النوعيه للسائل المراد تسخينه عند ضغط ثابت

t_{1i} = درجة حرارة دخول السائل قبل تسخينه

t_{1e} = درجة حرارة خروج السائل بعد تسخينه.

وكذلك يمكن حساب مساحة سطح التبادل الحرارى من المعادلة الآتيه :

$$Q=UA\,\Delta t_m \qquad (9\text{-}42)$$

حيث Δt_m هى الفرق المتوسط فى درجات الحرارة ويمكن حسابها من المعادله الآتيه :

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \dfrac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \qquad (9\text{-}43)$$

حيث ان :

Δt_i = فرق درجات حرارة الدخول الى المبادل الحرارى

$$\Delta t_i = t_2 - t_{1i}$$

Δt_e = الفرق فى درجات حرارة الخروج من المبادل الحرارى

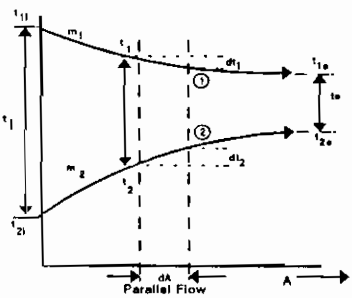
$$\Delta t_e = t_2 - t_{1e}$$

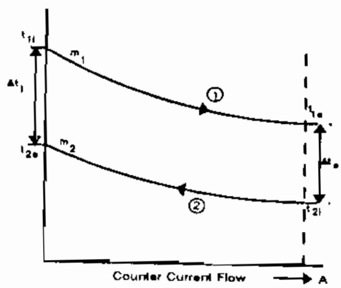
واذا كانت النسبه بين الفرق فى درجات حرارة الدخول الى الفرق فى درجات حرارة الخروج من المبادل الحرارى اقل من ٢ ، فانه يمكن استخدام المتوسط الحسابى للفرق فى درجات الحرارة بدلا من المتوسط اللوغاريتمى . اى ان :-

$$\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} < 2$$

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i + \Delta t_e}{2} \qquad (9\text{-}44)$$

<u>الفرق المتوسط فى درجات الحراره</u> <u>Mean Temp. Difference</u>:





شكل (٩-١٠) المبادل الحرارى المتوازى شكل (٩-٩) المبادل العكسى

سوف نقوم بتحليل الوضع فى حالة التبادل الحرارى المتوازى وذلك بأخذ مساحة تفاضليه مقدارها dA ويكون الفرق فى درجات الحرارة داخل المبادل الحرارى بين كل من المائع وسط التسخين (١) والمائع المراد تسخينه (٢)

$$\Delta t = t_1 - t_2 \qquad (9\text{-}45)$$

وكمية الحرارة المنتقله بين المائعين

$$d\,Q = U.dA.\,\Delta t \qquad (9\text{-}46)$$

وهى تساوى كمية الحرارة المفقوده من المائع الساخن

$$d\,Q = -\,m_1\,C_1\,\,dt_1 \qquad (9\text{-}47)$$

وتتساوى مع كمية الحرارة المكتسبه فى المائع المراد تسخينه (بافتراض أنه لايوجد فقد فى انتقال الحراره)

$$d\,Q = m_2\,C_2\,\,dt_2 \qquad (9\text{-}48)$$

لاحظ الاشارة السالبه فى المعادله رقم (9-47) حيث تدل على الانخفاض فى معدل انحدار درجة الحراره Temperature gradient

حيث ان :

t_1 = درجة حرارة المائع الساخن عند المقطع التفاضلى

t_2 = درجة حرارة المائع المراد تسخينه عند المقطع التفاضلى

U = المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحرارة التبادلى

m_1 = معدل سريان مائع التسخين

m_2 = معدل سريان المائع المراد تسخينه

C_1 = الحرارة النوعيه لمائع التسخين

C_2 = الحراره النوعيه للمائع المراد تسخينه

فاذا ما أجرينا التفاضل للمعادلة (9-45) نحصل على

$$d\,(\Delta t) = d\,t_1 \;-\; dt_2 \qquad (9\text{-}49)$$

وبالتعويض بمعادلتى (9-47) ، (9-48) فى معادلة (9-49) نحصل على الآتى:

$$d\,(\Delta t) = -\left(\frac{1}{m_1 C_1} + \frac{1}{m_2 C_2}\right) d\,Q = \; -\,a.\,dQ \qquad (9\text{-}50)$$

وبتكامل المعادلة (9-50) بين الفرق فى درجات الحرارة عند الدخول ودرجات الحرارة عند الخروج من المبادل الحرارى نحصل على :

$$\Delta t_i \;-\; \Delta t_e = a\,Q \qquad (9\text{-}51)$$

وبالتعويض عن معادلة (9-46) فى معادلة (9-50)) نحصل على :

$$\frac{d(\Delta t)}{\Delta t} = -a\,U\,dA \qquad (9\text{-}52)$$

وباجراء التكامل لطرفى المعادله (9-52) على سطح التسخين التبادلى فإن

$$\ln \frac{\Delta t_e}{\Delta t_i} = -a\,U\,A \qquad (9\text{-}53)$$

$$\text{or} \quad \Delta t_e = \Delta t_i \; e^{-a\,U\,A} \qquad (9\text{-}54)$$

وبالتعويض عن معادلة (9-51) فى معادلة (9-53) نحصل على :

$$Q = UA \; \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \dfrac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \qquad (9\text{-}55)$$

or

$$Q = UA \; \Delta t_m \qquad (9\text{-}56)$$

حيث الفرق المتوسط فى درجات الحراره Δt_m يعبر عنه

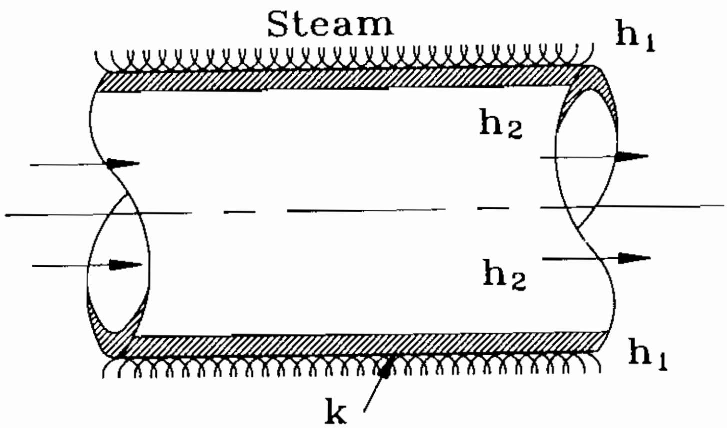
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \dfrac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \qquad (9\text{-}57)$$

ونلاحظ أن نفس الخطوات يتم إتباعها فى حالة المبادل الحرارى المتعاكس (العكسى) شكل (٩-١٠) وذلك بوضع:

$$a = \frac{1}{m_1 C_1} - \frac{1}{m_2 C_2} \qquad (9\text{-}58)$$

تعبر عن المتوسط اللوغاريتمي للفرق فى درجات الحرارة (9-57) ومعادلة وهوبطبيعة الحال مختلف عن المتوسط العددى أو الحسابى والذى يعبر عنه .

$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i + \Delta t_e}{2} \qquad (9\text{-}59)$$



شكل رقم (٩-١١) انتقال الحراره فى تكثيف البخار داخل اسطوانه

ويجب حساب المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى منسوبا الى مساحة السطح المنتقله منه الحراره الى السائل المراد تسخينه فمثلا اذا كان التسخين يتم بواسطة تكثيف بخار على السطح الخارجى لانابيب المبادل الحرارى فان :

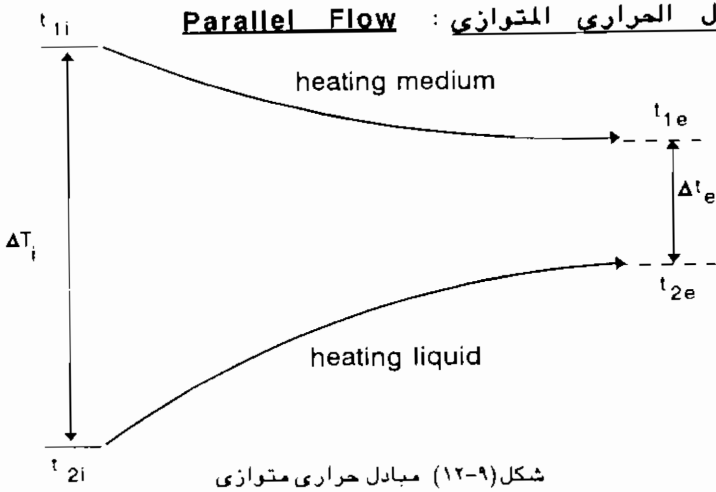
$$\frac{1}{UA_1} = \frac{1}{h_1 A_1} + \frac{1}{2\pi kL} \ln \frac{D_2}{D_1} + \frac{1}{h_2 A_2} \qquad (9\text{-}60)$$

حيث ان :

A_1 = مساحة السطح الخارجى لانابيب المبادل الحرارى .

A_2 = مساحة السطح الداخلى لانابيب المبادل الحرارى .

٢- المبادل الحراري المتوازي : Parallel Flow



شكل(٩-١٢) مبادل حرارى متوازى

وفى هذه الحالة يكون اتجاه مرور السائل فى نفس اتجاه مرور الوسيط الحرارى فترتفع درجة حرارة السائل تدريجيا بينما تنخفض درجة حرارة الوسيط الحرارى - وهذه الطريقة محدودة الاستعمال اذ ان فاعليتها ضعيفة نتيجة لعدم انتظام الفرق فى درجات الحرارة على طول مساحة سطح التبادل الحرارى .

وتتبع الخطوات الآتيه لحساب المساحه اللازمة للتبادل الحرارى :

أ - تحسب درجات حرارة السائل والوسيط وذلك بعمل موازنة حراريه .
كمية الحراره المنتقله من الوسيط = كمية الحراره المكتسبه بالسائل.

$$Q = m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e}) \quad (9\text{-}61)$$

$$= m_2 C_{p2} (t_{2e} - t_{2i}) \quad (9\text{-}62)$$

حيث ان :

m_1 = المعدل الوزنى لسريان الوسيط

m_2 = المعدل الوزنى لسريان السائل

t_{1i} = درجة حرارة دخول الوسيط المبادل الحرارى .

t_{1e} = درجة حرارة خروج الوسيط من المبادل الحرارى .

t_{2i} = درجة حرارة دخول السائل الى المبادل الحرارى .

t_{2e} = درجة حرارة خروج السائل من المبادل الحرارى .

C_{p1} = الحرارة النوعيه للوسيط .

C_{p2} = الحرارة النوعيه للسائل .

ب - يحسب الفرق المتوسط لدرجات حرارة المبادل فاذا كان :

$$\Delta t_i = t_{1i} - t_{2i}$$

$$\Delta t_e = t_{1e} - t_{2e}$$

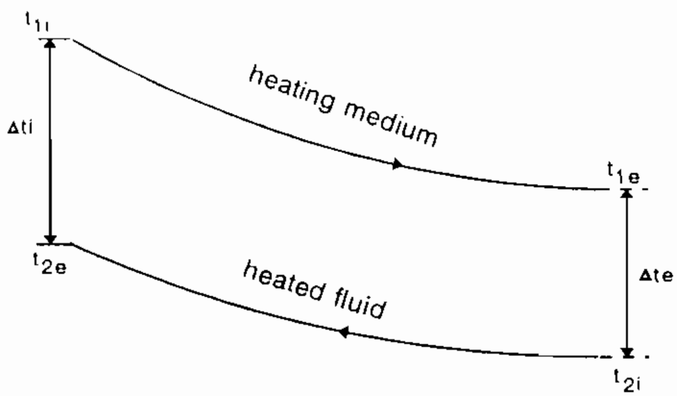
$$\Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}} \qquad (9\text{-}63)$$

ج- يوجد المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى "U" كما ذكر سابقا .

د- تحسب المساحه السطحيه للتبادل الحرارى من المعادلة الآتيه :

$$Q = UA\ \Delta t_m \qquad (9\text{-}64)$$

٣- المبادل الحراري العكسي او المتعاكس : Counter Flow



شكل (٩-١٢) مبادل حرارى متعاكس

وفى هذه الحالة يكون اتجاه مرور السائل فى عكس اتجاه مرور التسخين فى المبادل الحرارى ، فترتفع تدريجيا درجة حرارة السائل فى حين تنخفض تدريجيا درجة حرارة الوسيط تقريبا بنفس المقدار . وهذه الطريقة شائعة الاستعمال فى عمليات التصنيع اذ ان فاعليتها مرتفعه نظرا لان الفرق فى درجات الحرارة يكون تقريبا متساو على طول مساحة سطح التبادل الحرارى ويمكن بذلك استخدام مبادل عكسى بسطح تبادل حرارى اقل بكثير من مبادل متوازى لنفس كمية الحرارة المتبادله.

وتتبع نفس خطوات الحسابات التى ذكرت فى الطرق الاخرى مع اعتبار ان الفرق فى درجات حرارة الدخول والخروج من المبادل الحرارى تكون منسوبه لاتجاه سريان وسيط التسخين . اى ان :

$$\Delta t_i = t_{1i} - t_{2e}$$

$$\Delta t_e = t_{1e} - t_{2i}$$

<u>مثال</u> : مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتيه :

درجة حرارة دخول السائل	٩٣ر٧ °م
درجة حرارة دخول الماء	١٠ °م
درجة حرارة خروج الماء	٢٧ °م
معدل سريان السائل المراد تبريدة	٤٥٠ كجم/ساعه
معدل سريان ماء التبريد	٩٠٠ كجم/ساعه
الحراره النوعيه للسائل	٢ر٥٥ جول/جم °كلفن
الحراره النوعيه للماء	٤ر١٨ جول/جم ° كلفن

احسب :

أ - درجة حرارة خروج السائل (t_{1e})

ب- المساحه السطحيه لمواسير مرور السائل فى كل من الحالتين :

١-مبادل متوازى ٢- مبادل عكسى

اعتبر أن المعامل الكلى المكافىء للتبادل الحرارى فى كلا الحالتين :

$$U = 1700 \text{ Watt/m}^2.K$$

الحـــل

$$Q = m_1 C_{p1} (t_{1i} - t_{1e})$$

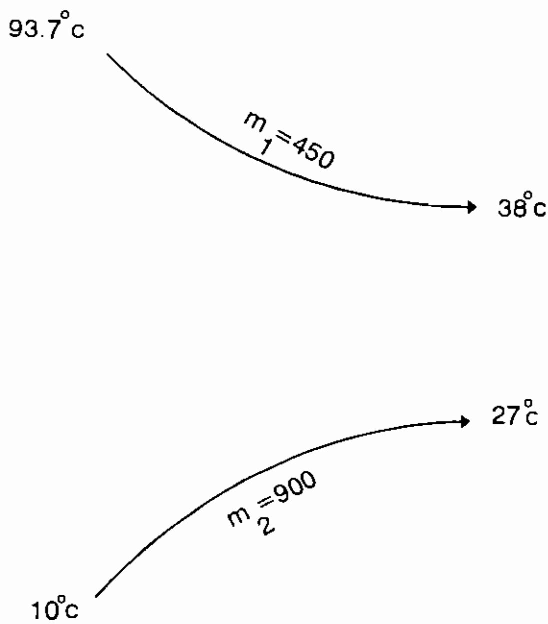
$$= m_2 C_{p2} (t_{2e} - t_{2i})$$

$$\therefore Q = (900)\ (4.18)\ (27 - 10) = 63954 \quad k.J/hr.$$

$$= (450)\ (2.55)\ (93.7 - t_{1e})$$

$$\therefore t_{1e} = 38 \ ^{o}C$$

١-في حالة مبادل متوازي :



$$\Delta t_i = 93.7 - 10 = 83.7 \ ^{o}C$$

$$\Delta t_e = 38 - 27 = 11 \ ^{o}C$$

وحيث أن $\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} = 7.6 > 2$

∴ نستخدم المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحرارة

$$\therefore \Delta t_m = \frac{\Delta t_i - \Delta t_e}{\ln \frac{\Delta t_i}{\Delta t_e}}$$

$$= \frac{83.7 - 11}{\ln \frac{83.7}{11}} = \frac{72.7}{\ln 7.6}$$

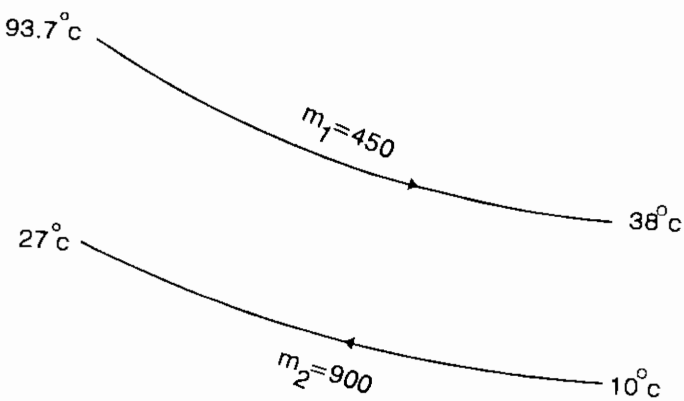
$$= \frac{72.7}{2.03} = 35.8 \ ^oC$$

$$\therefore Q = UA \Delta t_m$$

$$63954 = (A) \ (1700) \ (35.8)$$

$$\therefore A = 1.05 \ m^2$$

ب- **فى حالة مبادل عكسى** :



$$\Delta t_i = 93.7 - 27 = 66.7 \ ^oC$$

$$\Delta t_e = 38 - 10 = 28 \ ^oC$$

وحيث أن $\frac{\Delta t_i}{\Delta t_e} = 2.38 > 2$

∴ نستخدم المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحراره

$$\therefore \Delta t_m = \frac{66.7 - 28}{\ln \frac{66.7}{28}}$$

$$= \frac{38.7}{\ln 2.38} = \frac{38.7}{0.87}$$

$$= 44.5 \quad ^{o}C$$

$$\therefore Q = UA \, \Delta t_m$$

$$63954 = (A) \; (1700) \; (44.5)$$

$$\therefore A = 0.85 \quad m^2$$

ويتلاحظ أن مساحة سطح المبادل العكسى أقل من مساحة سطح المبادل المتوازى تحت نفس ظروف الأداء .

انتقال الحراره الغير مستقر
UNSTEADY STATE HEAT TRANSFER

يحدث انتقال الحرارة الغير مستقر عندما تتعرض فجائيا حدود المجموعات لتغير فى درجة حرارتها مع الزمن بمعنى ان درجة الحرارة على الحدود المذكورة لاتظل ثابته عند درجة واحدة طوال فترة الانتقال الحرارى وانما تتغير من وقت الى آخر لمدة قد تطول حتى تصل الى الاستقرار الحرارى . ومن الامثله الشائعه فى التصنيع الغذائى نذكر على سبيل المثال وليس الحصر : تبريد وتجميد اللحوم ، الاسماك وتبريد الفواكه والخضروات والمعامله الحراريه للمواد الغذائيه المعلبه ، وبسترة وتعقيم الالبان ومنتجاتها .

وهناك حالتان رئيسيتان قد امكن تحليلهما رياضيا وهما :

الحاله الاولى :-

١- عندما تكون المقاومه الحراريه للمادة المنتقله منها او اليها صغيرة جدا اى ان معامل انتقال الحراره بالتوصيل للمادة مرتفع نسبيا اذا ما قورن بالمقاومه الحراريه عند حدود المجموعه أى مع معامل انتقال الحراره بالنقل على حدود المجموعه . مثال ذلك تسخين او تبريد مواد جيدة التوصيل الحرارى كالحديد والنحاس وما شابهها .

٢- عندما تكون المادة المنتقله اليها او منها الحراره حجمها صغير نسبيا بحيث يمكن اهمال التغير فى درجة حرارتها من نقطة على سطحها مثلا مع نقطة فى منتصفها مثال ذلك عند معاملة بذرة القطن حراريا لقتل حيوية الجنين .

فاذا اخذنا فى الاعتبار الميزان الحرارى لهذه المجموعه (قانون ثبوت الطاقه) نجد أن :

$$C_p . \rho . v . \; dt \;=\; h.A. \; (t_o \;-\; t) \; d\theta \qquad (9\text{-}65)$$

or

$$\frac{dt}{t_o - t} = \frac{h.A}{C_p . \rho . v} \, d\theta \qquad (9\text{-}66)$$

حيث ان:

v = حجم المادة

C_p = الحرارة النوعيه للمادة

ρ = كثافة المادة

h = معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح المادة

t_o = درجة حرارة الجو المحيط بالمادة

t = درجة حرارة المادة عند السطح (او عند المنتصف)

A = مساحة السطح.

θ = الزمن

d = علامة التفاضل

ومع افتراض ان الخصائص الحراريه للمادة لاتتغير مع تغير درجة الحرارة وان درجة حرارة الجو المحيط بالمادة ثابته لاتتغير ، فانه يمكننا اجراء التكامل اللازم للمعادله رقم (9-66) لنحصل على :

$$\ln\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right) = -\frac{h.A}{C_p \cdot \rho \cdot v} \cdot \theta \qquad (9\text{-}67)$$

حيث :

t_1 = درجة حرارة المادة عند بدء التسخين أو التبريد

θ = الزمن الذى تصل فيه درجة حرارة المادة إلى t

ويمكننا استخدام هذه العلاقه عند استيفاء الشرطان السابق الاشاره اليهما او التحديد عندما تكون :

$$\left(\frac{h.L}{k}\right) \text{ أو } \left(\frac{h.r}{k}\right) < 0.2$$

<u>مثال</u> :

احسب درجة حرارة عمود من الصلب قطرة ٧٫٥سم وطوله ٣٠سم اذا وضع فجاءة فى فرن درجة حرارته ثابته عند ٣١٥°م بعد مضى ٤٠ دقيقه اذا كانت درجة حرارته الابتدائيه ٢٠°م . علما بأن :

معامل انتقال الحرارة بالنقل داخل الفرن = ٧٫٥ كيلوكالورى/ساعه متر مربع °م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للحديد الصلب = ١١٫٥ كيلوكالورى/ساعه متر . °م

الحرارة النوعيه للصلب = ١٢ر. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة الصلب = ٧٢٠٠ كجم/متر مكعب

الحل

نقوم اولا بحساب مقدار المقاومه الحرارية النوعية على السطح لمعرفة مدى امكاننا استخدام المعادله المذكورة .

$$\frac{hr}{k} = (7.5)\ \left(\frac{7.5}{2} \times \frac{1}{100}\right) \times \frac{1}{11.5} = 0.0245$$

كذلك نحسب

$$\frac{h.L}{k} = (7.5)\ \left(\frac{30}{100}\right) \times \frac{1}{11.5} = 0.196$$

وحيث انها اقل من ٢ر. فانه يمكننا استخدام المعادله المذكوره .

المساحه الاجماليه للسطح = مساحة الاسطوانه + مساحة الطرفين

$$= 2\pi r L + 2\pi r^2$$

or $$\text{Area} = 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100}\right)^2 + 2\pi \left(\frac{7.5}{2 \times 100}\right) \left(\frac{30}{100}\right)$$

$$= 0.0088 + 0.0707$$

$$= 0.0795 \quad m^2$$

$$\text{Volume} = \pi r^2 L$$

$$= \pi \left(\frac{7.5}{200}\right)^2 \left(\frac{30}{100}\right)$$

$$= 0.001325 \quad m^3$$

$$\therefore \quad \ln \left(\frac{t - 315}{20 - 315}\right) = - \frac{7.5 \times 0.0795}{0.12 \times 7200 \times 0.001325} \times \frac{40}{60}$$

$$= -0.347$$

or $$t = 315 + 0.707\ (20 - 315)$$

$$\therefore \quad t = 106.4\ ^oC$$

الحالة الثانية :

١- عندما تكون المقاومه الحراريه للماده المنتقله منها او اليها الحراره كبيرة نسبيا اذا ماقورنت بالمقاومه الحراريه عند حدود المجموعه اى انه يوجد تغيير سريع فى درجة حرارة سطح المادة وبالتالى لاتظل درجة حرارة سطح المادة ثابته عند كل نقطة فيها .

٢- معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للماده منخفض نسبيا مما يتسبب عنه تغير فى درجة حرارة المادة من نقطة الى نقطة داخل المادة نفسها .

وفى هذه الحالة فان المعادلة السابق ذكرها لاتنطبق ويجب الاخذ فى الاعتبار التغير فى درجة حرارة المادة فى الداخل وليس على السطح فقط . وتحليل هذه الظروف رياضيا خارج عن نطاقنا فى هذا المقرر ولو انه توجد خرائط مبسطه يمكن استخدامها مباشرة لحساب الوقت اللازم لتسخين او تبريد مادة ما تحت ظروف معلومه .

وقد وجد ان :

$\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)$ تعتمد على معامل فورير $\left(\frac{k\,\theta}{C_p.\rho.r^2}\right)$ Fourier Modulus

ومعامل بايوت $\left(\frac{hr}{k}\right)$ Biot Modulus ومعامل الحجم $\left(\frac{r}{r_o}\right)$

وذلك اذا كانت المادة على شكل كروى او اسطوانى لانهائى ، اما اذا كانت على شكل مضلع لانهائى فيستبدل نصف القطر r بنصف طول الضلع x.

ملحوظه :

عادة مانستخدم معامل الانتشار الحرارى Thermal Diffusivity فى حسابات انتقال الحرارة ومقداره :-

$$\text{معامل الانتشار الحرارى} = \frac{\text{معامل انتقال الحرارة بالتوصيل}}{\text{الحراره النوعيه} \times \text{الكثافه}}$$

$$\alpha = \frac{k}{C_p.\rho} \qquad (9\text{-}68)$$

ووحداته قدم مربع/ساعه بالوحدات الانجليزيه او متر مربع/ساعه بالوحدات المتريه.

مثال (١):

حائط سمكه ٦٠سم ، درجة حرارته الابتدائيه ٢٠ ^{o}م ، معرض من جانبيه لغازات ساخنه مندفعه عند درجة حرارة ٥٧٧ ^{o}م . فاذا علمت ان :

معامل انتقال الحراره بالنقل على سطح الحائط = ١٣٫٥ كيلو كالورى/ساعه متر^{٢} ^{o}م
معامل انتقال الحراره بالتوصيل لمـادة الحائط = ٤ كيلو كالورى/ساعه متر ^{o}م
الكثافه النوعيه لمادة الحائط = ٢٥٩٠ كجم/متر^{٣}
الحراره النوعيه لمادة الحائط = ٠٫٣ كيلوكالورى/كجم. ^{o}م

احسب درجة حرارة كل من منتصف الحائط وسطحه بعد مرور زمن مقداره ٨٫٧٥ ساعه .

الحـل

نحسب اولا رقم فورير = $\dfrac{\alpha\theta}{x^2}$

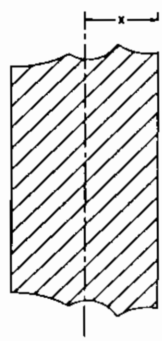
ونلاحظ هنا ان قيمة x تســاوى نصف سمك الحائط تساوى ٣٠ سم

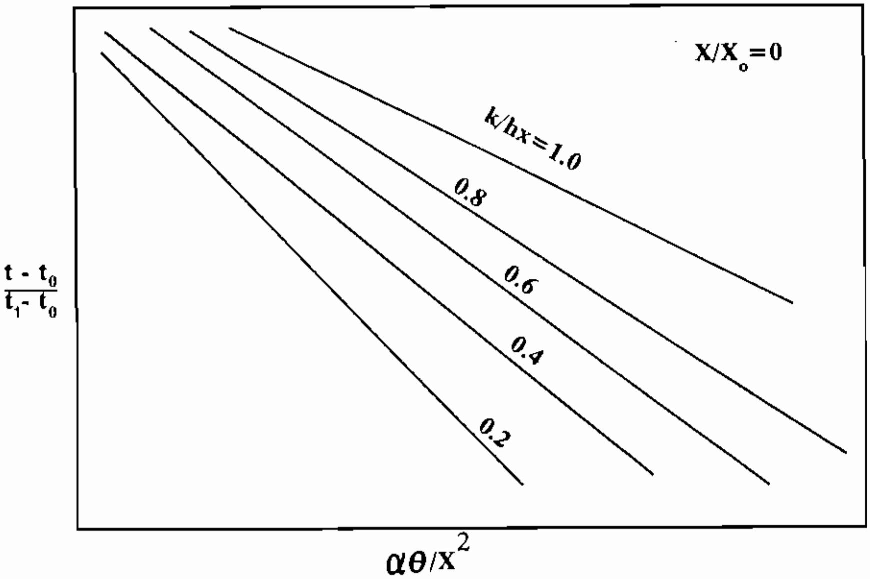
$$\alpha = \frac{k}{C_p \cdot \rho}$$

$$\alpha = \frac{4}{(0.3)(2590)} = 0.00515 \ m^2/hr.$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.00515)\ (8.75)}{(0.3)^2} = 0.5$$

$$\text{Biot number} = \frac{13.5 \times 0.30}{4} = 1.01$$





شكل (٩-١٤) خريطة التبادل الحرارى خلال منتصف حائط

نستخدم خرائط الانتقال الحرارى الغير مستقر فى حائط لانهائي ونلاحظ ان المحور الافقى يمثل قيم مختلفه لرقم فورير والمحور الرأسى يمثل النسبه بين الفرق بين درجات حرارة الحائط والجو المحيط به الى الفرق بين درجات حرارة الحائط الابتدائيه والجو المحيط به اى ان المحور الرأسى يعبر عن :

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}$$

كما نلاحظ ان الخريطه الاولى تستخدم لايجاد درجة حرارة منتصف الحائط ، والخريطة السادسة تستخدم لايجاد درجة حرارة سطح الحائط اى ان معامل الحجم $\frac{x}{x_o}$ فى الخريطة الاولى يساوى صفر . وفى السادسه يساوى واحد .

والمنحنيات المختلفه الموجودة فى هذه الخرائط هى لقيم مختلفه من مقلوب رقم بايوت اى للمقدار :

$$\frac{k}{h\,x}$$

باستخدام الخريطه الاولى (منتصف الحائط) : تقاطع الخط الرأسي من رقم فورير ٥ر٠ مع المنحنى ذو مقلوب رقم بايوت ١ ، يقابله معامل درجة الحرارة .

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = 0.8$$

$$t - 577 = (0.8)\ (20 - 577)$$

وعلى ذلك تكون

$$t = 577 - 445.6$$

$$= 131.4\ ^oC$$

وهى درجة حرارة منتصف الحائط (t)

ومن الخريطه السادسه (معامل الحجم = ١) نتبع نفس الخطوات السابقه لنجد ان :

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = 0.42$$

$$t - 577 = (0.42)\ (20 - 577)$$

$$t = 577 - 233.9 = 343.1\ ^oC$$

وهى درجة حرارة سطح الحائط

<u>مثال (٢)</u> :

من المشاكل الشائعه فى انتاج الحمضيات (الموالح) بالمناطق الباردة وصول درجات حرارة منتصف الثمار الى اقل من درجات التجمد خصوصا فى الليالى القارصه البرودة حيث تفقد الثمار كميات من الحرارة بالحمل والاشعاع من سطح الثمار وبالتوصيل من داخل الثمار الى الجو المحيط بها . ولمعالجة هذه المشكله توضع مواقد او مشاعل اسفل الاشجار بغرض رفع درجة حرارة الجو الى الحد الذى يسمح بعدم حدوث تجمد داخل الثمار . وعلى ذلك فانه من المطلوب حساب درجات الحرارة داخل الثمار وخارجها حتى يمكن معرفة الحرارة الكلية وطريقة توزيعها فى بساتين الحمضيات للتغلب على هذه المشكله .

لذلك يراد تقدير درجة حرارة منتصف ثمار البرتقال اذا كان قطر الثمره ١٠سم ودرجة الحرارة الابتدائيه ١٨°م ودرجة حرارة الجو المحيط -٤°م وتعرضت هذه الثمار لها مدة ٢٥ر٥ ساعه مع اعتبار الخصائص الآتيه :

معامل انتقال الحرارة بالنقل على سطح الثمار = ٣ كيلو كالورى/ساعه متر٢ °م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لداخل الثمار = ١٥ر. كيلو كالورى/ساعه متر °م

معامل الانتشار الحرارى لداخل الثمـــــــار = ٧٥ر٤ × ١٠^-٤ متر٢/ساعه

الحل

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000475)\ (5.25)}{(0.05)^2} = 0.9975$$

$$\text{Biot number} = \frac{(3)\ \left(\frac{10}{2 \times 100}\right)}{(0.15)} = 1.0$$

ومن خرائط الانتقال الحرارى الغير مستقر للاشكال الكرويه ، تستخدم الخريطة الاولى $0 = \left(\frac{r}{r_o}\right)$ منتصف الثمره .

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = 0.1$$

$$\therefore\ t - (-4) = (0.1)\ [18 - (-4)]$$

$$\therefore\ t = 2.2 - 4 = -1.8\ ^{o}C$$

درجة حرارة منتصف الثمار بعد خمسة ساعات وربع = -٨ر١ °م

مثال (٣) :

قطعة من اللانشون على شكل اسطوانة طولها ٦٠سم وقطرها ١٠ سم . وضعت فى فرن درجة حرارته ١١٥ °م بغرض معاملتها حراريا لمدة ٤ ساعات . احسب درجة حرارة المنتصف (المركز) اذا علمت ان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لجو الفرن = ٢٠. كيلو كالورى/ساعه متر٢ °م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للانشون = ١٣ر. كيلو كالورى/ساعه متر. °م

كثافة اللانشون النوعيه = ٠٧ر١ كجم/م٣

الحراره النوعيه للانشون = ٨ر. كيلوكالورى/كجم. °م

درجة حرارة اللانشون الابتدائيه = ٢٠ °م

الحـل

نفرض ان انتقال الحراره داخل اللانشون يكون قطرى وليس فى اتجاه المحور على اساس ان طولها كبير وممكن اعتباره لانهائى بالنسبه للقطر.

نستخدم خرائط انتقال الحرارة فى اسطوانه لانهائية الطول لايجاد درجة حرارة المنتصف اى اننا نستخدم الخريطه الاولى حيث $\left(\frac{r}{r_o}\right) = 0$

$$\text{Fourier number} = \frac{k\,\theta}{C_p . \rho . r^2}$$

$$= \frac{(0.13)\ (4)}{\left(\frac{5}{100}\right)^2\ (1070)\ (0.8)} = 0.243$$

$$\text{Biot number} = \frac{h\,r}{k}$$

$$= \frac{(300)\ \left(\frac{5}{100}\right)}{(0.13)} = 115.4$$

$\therefore$ Reciprocal or inverse Biot Number = 0.0087

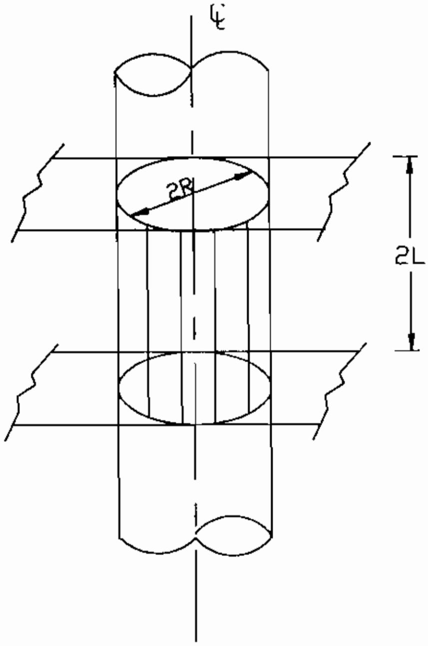
ومن الخريطة الاولى نجد ان :

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o} = 0.35$$

$$\therefore\ (t - 115) = (0.35)\ (20 - 115)$$

$$\therefore\ t - 115 = -33.25$$

$\therefore$ درجة حرارة المنتصف (t) $\quad t = 81.75\ ^oC$



شكل (٩-١٥) الانتقال الحرارى فى اسطوانه محددة الطول

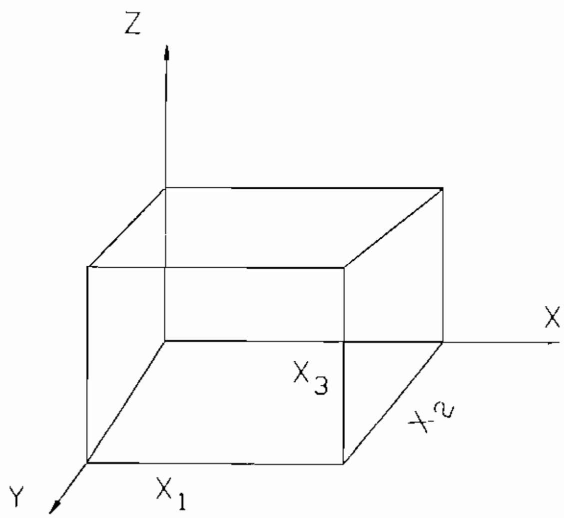
نلاحظ من الامثله السابقه اننا نعتبر اتجاه واحد لانتقال الحرارة سواء فى اتجاه القطر (قطريا) او فى اتجاه المحور (محوريا) وذلك باننا نهمل الاتجاهات الاخرى على اساس ان طول الاسطوانه كبير بالنسبه لقطرها او ان طول الحائط فى الاتجاهين الآخرين كبير بالنسبه لسمك الحائط . ولكن عادة مانقابل من الناحية العملية ان انتقال الحرارة يكون فى اكثر من اتجاه مثال ذلك عندما نعقم المعلبات الغذائيه باشكالها المختلفه سواء على شكل اسطوانى او على شكل متوازى اضلاع شكل (٩-١٥) حيث ان اطوال المعلبات فى الاتجاهات (الاحداثيات) المختلفه تكون متقاربه وعلى ذلك لايمكننا اهمال الانتقال الحرارى فيها ويمكن ايجاد الحلول الرياضية لهذه الحالات ولكن من الوجهه العملية فاننا نعتبر ان الشكل الموجود مكون من عدة مستويات متقاطعه مع بعضها لتشكيلة . ونقوم بحساب قيمة معامل درجة الحراره.

$$\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}$$

لكل اتجاه على حده ويكون الحل النهائى هو حاصل ضرب المعاملات مع بعضها. فمثلا تعتبر المعلبات الاسطوانية على انها اسطوانة لانهائية متقاطعه مع مستويين البعد بينهما هو ارتفاع او طول العلبه .

وتحسب درجة الحرارة من المعادلة الآتيه :

$$\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Cylinder}} = \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Infinite Cylinder}} \times \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Infinite Slab}} \quad (9\text{-}69)$$



شكل (٩-١٦) الانتقال الحرارى فى جسم ثلاثى الأبعاد

وبنفس الطريقة يمكن تقدير درجة حرارة معلب على شكل متوازى اضلاع باعتبار انه تقاطع ستة مستويات تبعد عن بعضها باطوال المضلع فى الاتجاهات الثلاثه .

وتحسب درجة الحرارة من المعادلة الآتيه :

$$\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{مضلع}} = \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Slab 1}} \times \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Slab 2}} \times \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Slab 3}} \quad (9\text{-}70)$$

مثال (١) :

عبئت مادة غذائية ذات محتوى رطوبي مرتفع فى علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨ر٤ سم والارتفاع الصافى ٦ر١٠سم) وكانت المادة الغذائية تملأ العلب تماما وكثافتها ١٠٩٠ كجم/متر^3 ودرجة حرارتها الابتدائية ٨٢^{o}م . وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته ١١٥^{o}م لمدة ثلاثة ساعات وذلك بغرض معاملة المعلبات حراريا - احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعلب اذا علمت ان :

الحراره النوعيه للمادة الغذائية المعلبه = ٨٤ر. كيلوكالورى/كجم.^{o}م

معامل انتقال الحرارة بالنقل للبخار = ١٥٠٠ كيلوكالورى/ساعه متر^2 . ^{o}م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة الغذائية = ١١٤ر. كيلوكالورى/ساعه.متر^{o}م

الحل

معامل الانتشار الحرارى (α) Thermal diffusivity

$$\alpha = \frac{k}{C_p.\rho} = \frac{(0.114)}{(0.84)\ (1090)}$$

$$= .000125 \quad m^2/hr.$$

نصف قطر العلبه (الاسطوانه) $\text{Radius of can} = \frac{8.4}{200} = 0.042\ m$

نصف إرتفاع العلبه $\text{Half height can} = \frac{10.6}{200} = 0.053$

وبعد ذلك يتم الحل على مرحلتين :

الاولى باعتبار ان الاسطوانه ذات طول لانهائى والمرحله الثانيه تعتبر ان الطول محدد ويكون اتجاه انتقال الحراره فى اتجاه المحاور الرئيسيه .

ويتم الحصول على درجة الحراره فى الموقع المطلوب معرفتها عنده وذلك بضرب قيمة كل حالة فى الآخرى وبالتالى يتم تحديد الوضع على طبيعته كمجسم وذلك كما يأتى :

أ- اسطوانه لانهائيه :

$$\text{Inverse Biot number} = \left(\frac{k}{h\, r_o}\right)$$

$$\frac{(0.114)}{(1500)\ (0.042)} = 0.00181 \sim \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{\alpha\, \theta}{r_o^2}$$

$$= \frac{(0.000125)(3)}{(0.042)^2} = 0.213$$

ومن خريطة إنتقال الحرارة الغير مستقر لمنتصف اسطوانه لانهائية أى أن :

نجد ان:

$$\left(\frac{r}{r_o}\right) = 0$$

$$\left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right) = 0.4$$

Infinite Cylinder

ب- حائط لانهائى :

$$\text{Reciprocal Biot number} = \left(\frac{k}{h\, x_o}\right)$$

$$= \frac{(0.114)}{(1500)\ (0.053)} = 0.00143 \sim \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{\alpha\, \theta}{x_o^2}$$

$$= \frac{(0.000125)(3)}{(0.053)^2} = 0.133$$

ومن خريطة إنتقال الحرارة الغير مستقر لمنتصف الحائط اللانهائية أى أن :

نجد أن :

$$\left(\frac{x}{x_o}\right) = 0$$

$$\therefore \quad \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Infinite Slab}} = 0.82$$

وعلى ذلك يمكن حساب درجة حرارة منتصف العلب الغذائى من حاصل ضرب النتيجتين فى كل من (أ) ، (ب) .

$$\therefore \quad \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{\text{Can}} = (0.4)\ (0.82) = 0.328$$

$$\therefore \quad \left(\frac{t - 115}{82 - 115}\right) = 0.328$$

$$t - 115 = (-33)\ (0.328)$$

$$\therefore \quad t = 104.18\ {}^{o}C$$

<u>مثال (٢)</u> :

اذا استبدلت العلبه الاسطوانية الشكل فى المثال رقم (١) بأخرى على شكل متوازى أضلاع بالمقاسات الآتيه ٣ر٧ × ٦ر٨ × ٢٥ر١٥سم إحسب درجة حرارة المنتصف تحت نفس الظروف السابقه .

الحل

Half-length of can in the first direction $= \frac{7.3}{200} = 0.0365$ m

Half-length of can in the second direction$= \frac{806}{200} = 0.043$m

Half-length of can in the third direction $= \frac{15.25}{200} = 0.762$ m

أ- الاتجاه الاول: (First direction)

$$\text{Reciprocal Biot number} = \frac{(0.114)}{(1500)\ (0.0365)} = 0.00208$$

$$\approx \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.0365)^2} = 0.2815$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{x_1} = 0.6$$

ب- الاتجاه الثانى : (Second direction)

Reciprocal Biot number =

$$= \frac{(0.114)}{(1500)\ (0.0430)} = 0.00177 \approx \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.043)^2} = 0.2$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{x_2} = 0.72$$

ج- الاتجاه الثالث : (Third direction)

$$\text{Reciprocal of Biot number} = \frac{(0.114)}{(1500)\ (0.0762)} = 0.001 \approx \text{Zero}$$

$$\text{Fourier number} = \frac{(0.000125)(3)}{(0.0762)^2} = 0.065$$

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{x_3} = 0.96$$

وعلى ذلك يمكن تحديد درجة حرارة منتصف المعلب الغذائى من حاصل ضرب النتائج فى كل من أ ، ب ، جـ .

$$\therefore \left(\frac{t - t_o}{t_1 - t_o}\right)_{Can} = (0.6)\ (0.72)\ (0.96) = 0.415$$

$$\therefore \left(\frac{t - 115}{82 - 115}\right) = 0.415$$

$$\therefore t = 115 - 13.7$$

$$\therefore t = 101.3\ ^{o}C$$

مسائل عامه

١- خزان من الحديد يحتوى على ٧ متر مكعب من الهواء الجاف عند ضغط مانومترى ٢٧٥ كيلو باسكال ودرجة حرارة ٢٠ ^{o}م . أوجد وزن الهواء الموجود فى الخزان . ماهو وزن النيتروجين اللازم اضافته الى هذا الخزان لرفع ضغط المخلوط الى ٤١٣ كيلو باسكال .

٢- ١ متر مكعب من الهيدروجين ضغطت تحت ضغط ثابت مقداره ٢٧٥ كيلو باسكال الى ان اصبح الحجم ٤ر. متر مكعب . اوجد الشغل اللازم لضغط هذا الغاز .

٣- ٣ر. متر مكعب من الهواء عند ضغط ١٠٣٤ كيلو باسكال تمدد داخل اسطوانه الى ان اصبح الحجم ١ متر مكعب اذا كان منحنى التمدد يتبع القانون $p.v^{1.4}=c$ اوجد الضغط النهائى للهواء .

٤- كمية من الهواء حجمها ٦ر. متر مكعب وعند ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال ، تمددت هذه الكميه داخل أسطوانه الى ضغط مطلق مقداره ١٠٣ كيلوباسكال. اوجد الشغل الناتج عن تمدد الهواء اذا كان منحنى التمدد يتبع :

أ - اجراء ايزوسيرمالى . ب- اجراء ادياباتيكى $p.v^{1.4}=c$

٥- ماهى كمية الحراره اللازمه لتسخين ٨ر١ كيلو جرام من الهواء من درجة حرارة -١ ^{o}م الى ١٥ ^{o}م اذا كانت الحراره النوعيه للهواء تحت حجم ثابت = ١٧٢ر. كيلوكالورى/كجم. ^{o}م والحراره النوعيه للهواء تحت ضغط ثابت تساوى ٢٣ر. كيلو كالورى/كجم. ^{o}م اذا كانت عملية التسخين تتم :

أ - تحت حجم ثابت ب- تحت ضغط ثابت

٦- ٨ر١ كيلوجرام من الهواء عند ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلوباسكال تشغل حجم مقداره ٣ر. متر مكعب . تمددت هذه الكميه الى حجم مقداره ٤ر١ متر مكعب . اوجد درجة حرارة الهواء النهائيه ، الشغل الناتج عن تمدد الهواء ، الحراره التى امتصت او طردت من هذا الهواء اذا تمدد الهواء :

أ - تحت ضغط ثابت.

ب- اجراء ايزوسيرمالى (درجة حرارة ثابته).

جـ- اجراء ادياباتيكى . (بدون فقد او اكتساب للحراره)

علما بان : $R = 289$ N.m/kg.K ، $C_p = 0.24$ ، $C_v = 0.17$

٧- ١ر متر مكعب من الهواء تحت ضغط مانومترى ٣ر١ ميجاباسكال ودرجة حراره ١٥ْم تمدد الى ٢٥ر. متر مكعب بدون امتصاص او فقد اى كمية من الحراره اى ان الاجراء اديباتيكى (γ = ٤ر١). اوجد وزن الهواء والضغط ودرجة الحراره بعد التمدد ما مقدار الشغل الناتج عن هذا التمدد ؟

٨- اسطوانه من الحديد الصلب مساحة قاعدتها ٠٦ر. متر مربع وارتفاعها ٤٥ سم بها كمية من الهواء تحت ضغط مانومترى مقداره ٦٨٩ كيلو باسكال وفى درجة حرارة ١٥ْم اذا كان الثابت النوعى للهواء ٢٨٩ نيوتن .متر/كجم .ْم احسب كمية الهواء الموجودة داخل الاسطوانه .

٩- ٣ر.متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق مقداره ٢٧٥ كيلو باسكال تمددت الى ٧ر متر مكعب اوجد الشغل الناتج عن هذا التمدد فى كل من الحالات الآتيه :-

أ - تحت ضغط ثابت.

ب- تحت درجة حرارة ثابته (ايزوسيرمالى).

حـ- اديباتيكى .

١٠- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانه واحدة قطرها ٢٣سم وطول مشوار الضاغط ٢٣سم ويدخل الهواء الاسطوانه عند ضغط ١.٣ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥ْم ثم يضغط اديباتيكا الى ٦٢٠. كيلو باسكال . اوجد القدرة الحصانيه النظريه اللازمه لادارة هذا الضاغط اذا كانت عدد لفات عمود الاداره ١٠٠ لفه/دقيقه وكذلك احسب كمية الهواء المضغوط فى الدقيقه .

١١- احسب التغيير فى الطاقه الكامنه ٥ر. كجم من الهواء عند درجة حرارة -١ْم اذا ضغط الهواء الى $\frac{١}{٥}$ حجمه الاصلى وكانت عملية الضغط تتبع القانون $pv^{1.3} = C$

علما بان :

$C_p = 0.24$ ، $C_v = 0.17$ ، مامقدار الحراره التى تبادلتها جدران الاسطوانه مع الهواء الجوى .

١٢- ١ر. متر مكعب من الهواء تحت ضغط مطلق ٤ر١ ميجاباسكال ودرجة حرارة ١٥ْم تمدد تحت ضغط ثابت الى ٢٥ر. متر مكعب . اوجد درجة الحرارة فى نهاية عملية الضغط وكذلك مقدار الشغل الناتج عن تمدد الهواء ومقدار التغير فى الطاقة الكامنه علما بان :

$R = 289\ N.m/kg.^{o}C$ ، ١٧ر = C_v ، ٢٤ر = C_p

١٣- غاز ما يتبع القانون الآتى :

$p.v. = 100\ T$

ومقدار C_v = ١٧٥ر ، فاذا تمدد كيلوجرام واحد من هذا الغاز الموجود تحت ضغط مطلق ٤١٣ كيلوباسكال من حجم ١٤ر. متر مكعب الى ٩ر. متر مكعب ، وكان قانون منحنى التمدد $p.v^{1.31} = C$. اوجد كمية الحرارة التى تبادلتها الاسطوانه المحتوية على هذا الغاز .

١٤- ضاغط هواء ذو وجه واحد واسطوانه واحدة قطرها ٥ر٧سم وطول مشوار الضاغط ١٥سم ، يدخل الهواء اسطوانة الضاغط عند ضغط مطلق ١٠٣ كيوباسكال ودرجة حرارة ١٥°م ويخرج الهواء المضغوط عند ضغط مطلق مقداره ٤ر١ ميجاباسكال اذا كانت سرعة دوران عمود الاداره ١٥٠٠ لفه/دقيقه . اوجد القدرة الحصانيه النظرية اللازمه لادارة الضاغط اعتبر ان عملية الضغط ادياباتيكية ومقدار $\gamma = 1,4$.

١٥- محطة خدمة عامه تستخدم هواء مضغوط عند ضغط مطلق ٨٢٧ كيلوباسكال ومقدار استخدام الهواء المضغوط ٢٨ متر مكعب/ساعه عند درجة حرارة -١°م. اذا استخدم ضاغط هواء ذو اسطوانة واحدة لتغذية المحطه بالهواء المضغوط ويدخل الهواء الى الضاغط عند ضغط مطلق مقداره ١٠٣ كيلوباسكال وكانت عملية الضغط ادياباتيكية ($\gamma = 1,4$) مامقدار اقل قدرة حصانيه تلزم لادارة هذا الضاغط ؟.

١٦- هواء عند ضعط مطلق مقداره ١٠٣ كيلوباسكال ودرجة حرارة -١°م يراد ضغطه الي ١٠٣٤ كيلوباسكال بواسطة ضاغط هواء ترددى ذ و اسطوانه واحده وكانت عملية الضغط تتبع القانون $pv^{1.2} = C$ ، $C_p = ,24$ ، $C_v = ,17$ ، $\gamma = 1,4$

احسب :

١- الشغل اللازم لادارة الضاغط لكل كجم واحد من الهواء .

٢- كمية الحراره التى اكتسبتها مياه التبريد لكل ١ كجم من الهواء .

٣- اذا استخدم رذاذ ماء داخل اسطوانة الضاغط لتبريد الهواء اثناء عملية الانضغاط حتى تكون درجة حرارته ثابته عند درجة دخول الهواء الى الضاغط ماذا تكون كمية الشغل المتوفرة من هذه العملية ؟

٤- اذا أدير هذا الضاغط بواسطة سير على طاره موصله الى محرك كهربائى يدور عند ٤٠٠ لفه/دقيقه مامقدار قدرة المحرك اللازم اذا كانت كفاءة الضاغط ٩٠٪ وكفاءة توصيل الحركه من المحرك الى الضاغط ٩٥٪ .

١٧- كم تكلف عملية تسخين ٤٥٠٠ كجم من محلول ما محتواه الرطوبى ٨٥٪ من درجة حرارة ٢١°م الى درجة حرارة ٧١°م اذا كانت عملية التسخين تتم ببخار على ضغط ٦٥ر كجم/سم^2 وجفافه ٩٠٪ بينما يخرج البخار المكثف على درجة حرارة ٧٧°م وثمن كجم الوقود ٦٠ قرشا وقيمته الحراريه ١٠٠٠٠ كيلوكالورى/كجم وقود ، وكفاءة جهاز التسخين ٨٨٪ وكفاءة الغلايه ٨٤٪ .

١٨- ماهى كمية الحرارة اللازمه لتحويل كيلوجرام واحد من الماء عند درجة حرارة ١٠°م الى بخار جاف ومشبع تحت الضغط الجوى العادى ، علما بان الحراره النوعيه للماء = ١ .

١٩- ما هى كمية اللبن التى يمكن تسخينها بواسطة ٤ كجم بخار جاف ومشبع تحت الضغط الجوى العادى من درجة ١٨°م الى ٦٣°م علما بان الحراره النوعيه للبن تساوى ٩ر ويخرج البخار المكثف عند درجة حرارة ٣٦°م .

٢٠- ماهى كمية الحراره الكليه الموجوده فى ١٠ كجم بخار ، اذا علمت ان نسبة جفافه ٩٠٪ وضغطه ٨ر٣ كجم/سم^2 .

٢١- ماهى كمية البخار اللازم لتسخين ١٨٠٠ كجم من محلول ملحى حرارته النوعيه ٨٨ر من درجة ١٩°م الى ٥٤°م ، علما بان البخار المستخدم ضغطه واحد كجم/سم^2 ونسبة جفافه ٩٦٪ وكفاءة جهاز التسخين ٨٠٪ ويخرج البخار المتكثف عند درجة حرارة ٦٣°م .

٢٢- ماهى كمية الزيت التى يمكن تسخينها من ٢٥°م الى ١١٠°م بواسطة ١٠٠ كجم من البخار الذى ضغطه ٧ كجم/سم^2 وجفافه ٧٥٪ اذا كانت حرارة الزيت النوعيه ٧ر . وكفاءة جهاز التسخين ٨٠٪ وحرارة الماء المكثف ٥٤°م.

٢٣- ماهى كمية الوقود وتكاليفه اللازمه لعملية بسترة ٧٥٢٠ كجم من اللبن على درجة ٦٥°م بواسطة بخار ضغطه ٢ر٤ كجم/سم^{2} وجفافه ٩٥٪ اذا علمت ان حرارته النوعيه ٩ر وان كفاءة جهاز البسترة ٧٢٪ ويخرج الماء المكثف عند درجة حرارة ٦٤°م وان الغلايه كفاءتها ٧٠٪ وتعمل بوقود قيمته الحراريه ١٠٠٠٠ كيلوكالورى/كجم وثمن الكيلو جرام الواحد منه ٦٠ قرشا وان حرارة اللبن قبل البسترة تماثل حرارة الجو اى حوالى ٢٦°م.

٢٤- باستخدام جداول البخار اوجد كمية الحراره اللازمه لتحميص واحد كجم من البخار الجاف عند ضغط مطلق مقداره ٧ كجم/سم^{2} الى درجة حرارة ٢٠٠°م.
احسب الحراره النوعيه للبخار المحمص.

٢٥- احسب الحراره الكليه لبخار محمص عند ضغط مطلق ١٤كجم/سم^{2} ودرجة حرارة ٢٣٢°م اعتبر ان الحراره النوعيه للبخار المحمص = ٥٥ر. قارن النتيجة باستخدام جداول البخار .

٢٦- احسب الحراره اللازمه لتحويل ٢ كجم من بخار رطب عند ضغط ٥ر٣ كجم/سم^{2} ونسبة جفافه ٨٠٪ الى بخار محمص درجة حرارته ٢٠٠°م.

٢٧- احسب وزن بخار رطب حجمه ٠٠ر١ متر مكعب عند ضغط مطلق ٨ر٠ كجم/سم^{2} وجودته ٧٠٪. ماهى الحراره الكليه لمتر مكعب واحد من هذا البخار بوحدات كيلوكالورى /سم^{3}.

٢٨- احسب القيمه التقريبيه لحجم واحد كجم من بخار محمص عند ضغط مطلق ٢١ كجم/سم^{2} ودرجة حرارة ٢٦٠°م.

٢٩- احسب حجم واحد كجم من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^{2} ودرجة حرارة ٢٨٠°م مستخدما :
أ - القانون العام للغازات .
ب- قانون كالندر.

٣٠- اوجد الطاقه الكامنه لكجم واحد من بخار محمص عند ضغط مطلق مقداره ١٠ كجم/سم^{٢} ودرجة حرارة ٢٨٠^{o}م . اذا تمدد هذا البخار الى بخار رطب عند ضغط مطلق ١كجم/سم^{٢} ونسبة جفافه ٩٠٪ ، اوجد التغير فى الطاقه الكامنه لهذا البخار .

٣١- سخن مخلوط من الماء والهواء فى اناء مغلق ، عند وقت معين كان الضغط المطلق للمخلوط ٩ر٤ كجم/سم^{٢} ودرجة الحراره ١٤٠^{o}م اوجد:

أ - وزن الهواء الموجود مع كل كجم بخار .

ب- الضغط فى الاناء المغلق عندما تصل درجة حرارة المخلوط ١٩٠^{o}م علما بانه مازال يوجد بعض الماء فى الاناء .

٣٢- حجم غلاية تجارب صغيرة ١٧ر٠م^{٣} تحتوى على ٥ر٠ كجم من الماء عند ضغط مطلق ١٠٣ كيلوباسكال ودرجة حرارة ١٥^{o}م ويشغل الهواء باقى حجم الغلايه . وعند تشغيل الغلايه وصلت درجة حرارة المخلوط ١٤٠^{o}م وكان لايزال محبس البخار العمومى مغلق تماما . احسب الضغط الموجود فى الغلايه عند هذه الدرجة .

٣٣- يتم الحصول علي البيانات التاليه للزوجه الظاهريه لعصير الخوخ المصفى عند ٣٠^{o}م وذلك باستخدام ريومتر انبوبى قطره ٢٨ر٠ سم وطوله ١٠٠سم.

اللزوجه الظاهريه (باسكال - ثانيه)	..٤.٦	..٣.١	..٢٥٥	.٢.٩	..١٧٤	..١٦٤	..١..	...٧٥
معدل القص (١/ثانيه)	١٢١	٢.٥	٢٨٥	٢٨.	٥.٥	٧٢.	١٢..	٢١٥.

احسب كل من k ، n .

٣٤- قارن بين الفقد فى الضغط الناتج عن الاحتكاك عند سريان كلا من الماء ومركز الموز المصفى كل على حده ، فى انبوب قطره الداخلى ٢٥ر١ سم ومعدل التصرف ٢٥ر١ كجم/ثانيه وطول الانبوب ٣ امتار وخصائص مركز الموز k = ٦ باسكال . ثانيه^{n} ، n = ٤٥٤. . والكثافه ٩٧٥كجم/متر مكعب. علما بان لزوجة المياه النقيه تساوى ١٤٨٨ x ١٠$^{-٣}$ باسكال . ثانيه.

٢٥- احسب كل من معامل الاحتكاك f ومقدار طاقة الحركة لسريان عصير المشمش المصفى فى انبوبه قطرها ٢سم وطولها ٥ امتار بمعدل تصرف ١ متر مكعب/ثانيه علما بان خصائص عصير المشمش هى كما يلى :

k = ٢٠ باسكال . ثانيه^n ، n= ٠.٣ ، وكثافة العصير ١٠٤٠ كجم/متر مكعب.

٢٦- تم الحصول على النتائج التجريبيه الآتيه من جهاز لزوجة أنبوبى Tube viscometer قطره R = 0.267 cms وطوله L = 0.91 m. وكان السائل المستخدم هو صلصة التفاح Apple Sauce.

2.7	2.41	2.13	1.99	2.56	1.45	1.3	ΔP Pascal x 10^5
12.49	8.5	5.2	3.2	2.1	2.5	0.91	Q m^3/sec.10^{-4}

احسب كل من n , k.

٢٧- تم الحصول على القياسات الاتيه للمولاس عند درجة حرارة 274 K مستخدمين ريومتر احادى الاسطوانه طولها 0.1143 m. وقطرها 0.159 m. إحسب كل من n , k.

٢٨- إحسب قيمة رقم رينولدز Re لتحديد نوع السريان لمركز الطماطم ٣٠٪ مواد صلبة ذو الخصائص الآتيه : n = 0.4 , k = 18 Pa.s^n اذا كان مركز الطماطم يسرى فى انبوب قطره ٢سم عند سرعة سريان تساوى ١,٢ متر/ث ماذا تكون قيمة Re في حالة استخدام مياه

ρ_{Tomato} = 1130 kg/m^3 ρ_{water} = 1000 kg/m^3 μ_{water} = 1488 x 10^{-3} Pa.sec.

٢٩- يتم ضخ مركز الموز المصفي خلال ماسورة قطرها ٤سم بسرعة متوسطة قدرها ٢,٣ متر/ث ودرجة حرارة ٢٥°م أوجد معامل الاحتكاك وحدد نوع السريان اذا كان:

$n = 0.454$ $k = 6$ Pa.s^n ρ_{banana} = 975 kg/m^3

٤٠- يلزم تشغيل مروحه هواء بالمواصفات الآتيه : ١٧٠م^3/ق عند ضغط ٥سم ماء. فاذا فرض انها تشابه من ناحية التصميم مروحة هواء تعمل عند المواصفات الآتيه :

٢٨م^3/ق عند ضغط ٢,٧سم ماء وعدد لفاتها ١٠٠٠ لفه/دقيقه وقطر قرص الريش ٩٠سم ومقدار القدرة الحصانيه اللازمه لادراتها ٢,٧ حصان ميكانيكى اوجد قطر قرص الريش اللازم للمروحه المطلوب تشغيلها . وعدد لفاتها والقدره الحصانيه اللازمه لادارتها .

٤١- مروحة هواء تعمل عند ضغط ٢ر٢سم ماء ومقدار تصرفها ٢٨م^{٣}/ق يلزمها ٦ر٢ حصان لادارة عمود الحركة الذى يدور عند ١٠٠٠ لفه/دقيقه . اذا أريد تقليل تصرفها الى ٢م^{٣}/ق . ما مقدار السرعه والقدرة الجديدة للمروحه. احسب النسبه المئويه فى تخفيض قدرتها الحصانيه .

٤٢- مروحه كفاءتها ٦٥٪ ومقدار تصرفها ١٩٨م^{٣}/ق عند سرعة دوران ٧٠٠ لفه/دقيقه تعمل عند ضغط كلى مقدارة ٦سم ماء. اذا استخدمت هذه المروحه لتعمل فى منطقة مرتفعه عند ضغط مقداره ٦ر٥سم ماء وسرعتها تغيرت لتصبح ٨٥٠ لفه/دقيقه . ما مقدار كل من تصرفها وقدرتها الحصانيه فى الحاله الجديده .

٤٣- احسب القدره الحصانيه اللازمه لرفع ٧٥ لتر/ق من الماء من خزان الى آخر على ارتفاع ٦ر٥م علما بان مقدار الفقد فى الرفع نتيجة لاحتكاك السائل فى المواسير يوازى ٥٪ من مقدار الرفع المانومترى ، ومقدار سرعة سريان الماء فى المواسير ٢م/ثانيه .

٤٤- اوجد مقدار التصرف بوحدات م^{٣}/دقيقه لطلمبة ترددية مكونه من اسطوانه واحدة لدفع لبن وقطر الاسطوانه ١٠سم وطول مشوار المكبس ١٥سم والكفاءه الحجميه للطلمبه ٩٥٪ ، وعدد لفات عمود المحرك ١٠٠ لفه/دقيقه.

٤٥- اذا رفع ٤م^{٣} من اللبن مقدار ٦م فى ٢٠ دقيقه مامقدار الشغل اللازم لاتمام هذه العمليه؟ مامقدار القدره الحصانيه الناتجه ؟ اذا كان قطر ماسورة الدفع ١٣سم وكثافة اللبن ١.٣٢ كجم/م^{٣} احسب سرعة مرور اللبن فى ماسورة الدفع.

٤٦- آلة تجنيس لبن تعمل عند ضغط ١٧ ميجاباسكال سعتها ٢٢ لتر/ق اذا كانت كفاءة الطلمبه المستخدمه فى الجهاز ٨٢٪ اوجد القدرة الحصانيه للموتور اللازم لادارة الطلمبه . ماذا تكون القدرة الحصانيه اللازمه لادارة نفس الطلمبه اذا انخفض ضغط التشغيل الى ١٠ ميجاباسكال اهمل الاحتكاك داخل ماسورة التوصيل . (٤ لتر لبن فى الدقيقه = ٢٢ر كجم لبن فى الساعه).

٤٧- مضخه تدور بسرعة ١٧٦٠ لفه/دقيقه ومقدار تصرفها ٤٧٢ لتر/ق عند رفع مانومترى مقدارة ١٥م ويلزم لادارتها ٦٣ر١ حصان ميكانيكى . اذا زادت السرعه الى ٢١٠٠ لفه/دقيقه . اوجد كل من مقدار التصرف والرفع والقدره الحصانيه الجديده .

٤٨- طلمبه ذات قرص ريش قطره ١٨سم ومقدار تصرفها ٥١١ لتر/ق عند رفع مانومترى ١٢م يلزمها ١٫٦٣ حصان . اذا زاد قطر قرص الريش الى ١٨سم وكانت سرعة الطلمبه ثابته ، اوجد كل من مقدار التصرف والرفع المانومترى والقدرة الحصانيه الناتجه لادارة الطلمبه .

٤٩- من واقع تجربة لمعرفة كفاءة مضخة مياه من النوع الطارده المركزيه وجد الآتي:-

قطر ماسورة التصرف الخارجي لمياه الطلمبه	٥سم
سرعة المياه فى ماسورة الخروج	٤م/ث
الارتفاع الاستاتيكى	١١متر
مقدار الفقد فى الرفع	٠٫٦ متر
سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه	١٤٥٠ لفه/دقيقه
القدرة الحصانيه للموتور	٢ حصان
كفاءة الموتور	٩٥٪
كفاءة توصيل الحركه الميكانيكيه للمضخه	٨٥٪

احسب الكفاءة الهيدروليكيه للمضخه .

٥٠- اذا زادت السرعه فى المسأله السابقه الى ٢٠٠٠ لفه/دقيقه اوجد مواصفات التشغيل الجديده . هل يمكن استخدام الموتور السابق فى ادارة المضخه ؟

٥١- مضخه ترددية مكونه من اسطوانه واحدة تستخدم فى توصيل اللبن (كثافته ١٫٠٢٦ كجم/م^3) الى جهاز تجنيس تحت ضغط مرتفع مقداره ٦ ميجاباسكال. فاذا علمت ان قطر اسطوانة المكبس ١٠سم وطول المشوار ١٥سم وعدد لفات الموتور ١٠٠ لفه/دقيقه وكفاءة المضخه ٧٠٪ . احسب مقدار تصرف الطلمبه فى الدقيقه والقدرة الفرمليه اللازمه لادارة المضخه .

٥٢- من واقع تجربة لمعرفة كفاءة طلمبة مياه من النوع الطارد المركزيه وجد الآتى :

قطر ماسورة تصرف المياه	٧٫٥سم
سرعة المياه فى ماسورة التصرف	٤٫٨م/ث
الرفع الاستاتيكى	١٢م
مقدار الفقد فى الرفع نتيجة احتكاك السائل	١٫٥م
سرعة الموتور اللازمه لادارة الطلمبه	١٤٥٠ لفه/دقيقه
القدرة الحصانيه للموتور	٧ حصان ميكانيكى

كفــــــــــاءة الموتــــــــــور ٩٥٪
الكفاءة الميكانيكيه لتوصيل الحركه للطلمبـه ٨٥٪

احسب الكفاءة الهيدروليكيه للطلمبه اذا زادت السرعه الى ٢٠٠٠ لفه/دقيقه . اوجد مواصفات التشغيل الجديده . هل يمكن استخدام الموتور الكهربانى السابق فى ادارة الطلمبه فى الحاله الجديده ؟.

٥٣- احسب القدره الحصانيه اللازمه لرفع ٧٥ لتر/دقيقه من الماء من خزان الى آخر على ارتفاع ٨م علما بان مقدار الفقد فى الرفع نتيجة لاحتكاك السائل فى المواسير يوازى ٥٪ من مقدار الرفع المانومترى ، ومقدار سرعة سريان الماء فى المواسير ٢م/ث. اعتبر ان كفاءة الموتور ٨٠٪ وكفاءة الطلمبه ٥٠٪ .

٥٤- غرفة تبريد درجة حرارتها ٥ر٤°م معزوله بطبقة من الفلين بسمك ٥سم ومساحتها السطحيه ٤م^2 والجو المحيط بها عند درجة حرارة ٢١°م . احسب كمية الحراره التى تنتقل الى داخل غرفة التبريد فى الساعه اذا علمت ان معامل انتقال الحراره بالتوصيل للفلين ١٣ر كيلوكالورى/ساعه.متر.°م .

٥٥- فرن حائط مكون من طبقتين الاولى بسمك ٢٠سم ومعامل توصيلها ٤ر. والثانيه بسمك ٢٠ سم ومعامل توصيلها ١٨ر. فاذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى ٩٨٠°م ، والخارجى ٣٢°م - احسب كمية الحرارة المفقوده فى الساعه .

٥٦- قدر نسبة الانخفاض فى الفقد فى كمية الحراره نتيجة لوضع الطبقه الثانيه فى المسأله السابقه التى معاملها ١٨ر. ، ثم احسب درجة حرارة سطح التلامس بين الطبقتين.

٥٧- اوجد معدل الفقد فى الحراره لكل متر مربع من حجرة توصيل الهواء الساخن الى مجفف . وجدران هذه الغرفه معزوله بطبقة من الصوف الزجاجى بسمك ١٠سم ودرجة حرارة الحجرة من الداخل ١٥°م ومن الخارج ٢٥°م . اعتبر ان معــــامل انتــقـــال الحــــراره بالتـــوصــيل للصــــوف الزجـــاجى ١٢ر.كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

٥٨- حائط من الحديد سمكه ٢٥ر١ سم (k =١٣.ر.كيلوكالورى/ساعه متر.°م) يفصل طبقتين من الهواء الساخن كل منهما عند درجة حرارة ٣١٥°م ، ٥٠°م علـــــى

الترتيب ، ومعامل انتقال الحراره بالحمل لكل منهما هو h = ٣ر٠ كيلو كالورى/ساعه.متر^{٢}.^{o}م.
احسب معدل انتقال الحراره فى الحائط لكل متر مربع من السطح .

٥٩- طبقه من الهواء (k = ١ر٠ كيلوكالورى/ساعه.متر.^{o}م) بسمك ١٠٠ر٠سم تفصل حائط مصنوع من الحديد بسمك ٢ر١سم عن حائط مصنوع من الالومنيوم بسمك ٥ر٢سم . احسب معدل انتقال الحراره لكل متر مربع اذا كانت درجة حرارة حائط الحديد من الخارج ٢٠٥^{o}م ودرجة حرارة حائط الالومنيوم من الخارج ٣٨^{o}م
k للحديد = ٦ر١٣ ، k للالومنيوم = ٥٤ .
احسب كذلك درجة حرارة سطح التلامس بين الطبقتين .

٦٠- احسب معدل الفقد من حائط مكون من ثلاثة طبقات كالآتى : ٥ر٢٢سم طوب حرارى ، ١٢سم مادة عازله ، ١٠ سم من طوب احمر اذا كانت درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للحائط ١٠٠^{o}م ، ٤٠^{o}م على الترتيب علما بان :
k للطوب الحرارى = ١٠٠ر١ ، k للطوب الاحمر = ٤٩ر١ و k للمادة العازله = ١٢ر٠ كيلوكالورى/ساعه.متر.^{o}م .

٦١- احسب درجة حرارة السطح الخارجى لحائط مساحة سطحه ١٠ متر مربع ، اذا كان معدل الفقد فى الحرارة منه الى الجو الخارجى ٨٠٠ كيلوكالورى/ساعه ، درجة حرارة الجو الخارجى ٢٠^{o}م علما بان :

$$h = 1,13\,(t_s - t_o)^{\frac{1}{4}} \qquad kcal./m^2.hr.^oC$$

٦٢- من المعلوم نظريا انه يمكن التعبير عن معامل انتقال الحراره بالحمل من السطح الخارجى للمواسير الافقيه من المعادله الآتيه :

$$h = 1.13\left(\frac{t_s - t_o}{D}\right)^n \qquad kcal./m^2.hr.^oC$$

حيث ان:

t_s = درجة حرارة السطح الخارجى للماسورة (^{o}م)

t_o = درجة حرارة الجو الملامس للسطح الخارجى للماسورة(^{o}م).

D = القطر الخارجى للماسورة (متر).

وبعمل تجربة على ماسوره قطرها الخارجى ١٥ سم وجد ان درجة حرارة سطحها الخارجى ١١٠°م ، ودرجة حرارة الجو الملامس لهذا السطح ٣٠°م ، وكمية الحراره المفقوده من الماسورة لكل متر طولى منها ٢٠٥ كيلوكالورى/ساعه .متر طولى .
احسب الأس " n " فى المعادله السابقه .

٦٣- ماسورة بخار قطرها الخارجى ١٧سم مغطاه بطبقة من مادة عازله سمكها ٥سم (k للمادة العازله = ٠٨ر كيلوكالورى/ساعه.متر.°م). ومغلفه بطبقة اخرى من مادة عازله بسمك ٤سم (k للمادة العازله = ٠٦ر كيلوكالورى/ساعه.متر.°م).
احسب كمية الحرارة المفقوده من سطح الماسورة اذا كان طولها ١٢٠ متر ، علما بان درجة حرارة السطح الداخلى والخارجى للمواد العازله ٤٢٦°م ، ٣٨°م على الترتيب اهمل مقاومة سمك جدار الماسورة لمرور الحرارة .

٦٤- كره مجوفه من الحديد قطرها الداخلى والخارجى ١٤سم ، ١٦سم على الترتيب احسب كمية الحرارة اللازمه لتسخين الكره من الداخل حتى يكون الفرق فى درجات الحراره بين السطح الداخلى والخارجى ٤°م (k للحديد = ٣٠ كيلوكالورى /ساعه . متر . °م).

٦٥- احسب كمية الحرارة المتبادلة بالاشعاع بين سطحين لانهائيين متوازيين عند درجات حرارة ٢٦٠°م ، ٩٣°م (اعتبر ان الاسطح سوداء).

٦٦- اذا كانت الاسطح فى المسأله السابقه رماديه ونسبة اشعاعها ٨ر ، ٦ر٠ ، ماهى كمية الاشعاع الحرارى المتبادل لكل متر مربع من الاسطح .

٦٧- احسب كمية الحرارة المشعه من سطح ماسورة إذا كان نسبة اشعاعه ٨ر٠ ، قطرها الخارجى ٩ سم ودرجة حرارة سطحها الخارجى ١٠٠°م وتمر داخل غرفة كبيرة درجة حرارة الهواء بها ٢٠°م .

٦٨- مبادل حرارى عكسى يستخدم لتبريد زيت بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتيه:-

درجة حرارة دخول الزيت	٨٢°م
درجة حرارة دخول المـــاء	٢٤°م
درجة حرارة خروج المـــاء	٦٥°م
وزن الزيت المراد تبريده	٦٨٠ كجـم/ساعه

كمية الماء اللازمه للتبريد ٣٥٤ كجم/ساعه

الحراره النوعيه للـــزيت ٥ر كيلوكالورى/كجم. °م

اوجد :

أ - درجة حرارة خروج الزيت.

ب- المساحه السطحيه لكل ماسوره من مواسير مرور الزيت .

اعـــتـــبـــر ان المعـــامل الكلى المكافى لانتـــقـــال الحـــراره U = ٣٠٠ كيلوكالورى/ساعه.م^{٢}. °م.

٦٩- مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتيه :-

درجة حرارة دخول السائل ٩٣°م

درجة حرارة دخول المـــاء ١٠°م

درجة حرارة خروج المـــاء ٢٧°م

معدل سريان السائل المراد تبريده ٣٥٤ كجـم/ساعه

معدل ماء التبريـــــــد ٩.٧ كجم/ساعه

الحراره النوعيه للسائل ٦ر كيلوكالورى/كجم. °م

احسب :

أ- درجة حرارة خروج السائل .

ب- المساحة السطحيه لمواسير المبادل فى كل من الحالتين :

١- مبادل متوازى . ٢- مبادل عكســى .

٧٠- غلايه بخاريه تولد بخار ماء محمص عند ضغط مطلق مقداره ٤ كجم/سم^{٢} ومقدار درجات التحميص ٥°م فوق درجة حرارة التشبع عند هذا الضغط . استخدم هذا البخار فى مصنع لبسترة الالبان ، فاذا كانت ماسورة البخار الموصله من الغلايه الى جهاز البسترة قد تركت بدون مادة عازلة ووجد ان البخار يصل الى جهاز البسترة رطبا ودرجة جفافه ٩٦٪ عند ضغط مطلق مقداره ٥ر٣ كجم/سم^{٢} . احسب كمية الحرارة التى فقدها كجم واحد من البخار بسبب وجود الماسورة الغير معزوله .

٧١- احسب كمية البخار اللازمه لجهاز البسترة فى المسأله السابقه لتسخين ٥٠٠ كجم من اللبن من درجة حرارة ٣٥°م الى ٨٥°م علما بان كفاءة جهاز البسترة ٨٥٪ والحرارة النوعيه للبن٩٣ر. كيلو كالورى/كجم. °م.

٧٢- مبادل حرارى يستخدم لتبريد سائل بواسطة ماء بارد بالمواصفات الآتيه :-
درجة حرارة دخول السائل ٩٣°م ، درجة حرارة دخول الماء ٧°م ، ودرجة حرارة خروج الماء ٣٢°م ، وزن السائل المراد تبريده ٣٥٤ كجم/ساعه ، كمية الماء اللازم للتبريد ٧٢٥ كجم/ساعه : الحراره النوعيه للسائل ٧٢ر. كيلوكالورى/كجم.°م.
احسب :
أ- درجة حرارة خروج السائل.
ب- المساحه السطحيه لمواسير المبادل فى كل من الحالتين :
١- مبادل متوازى. ٢- مبادل عكسى .

٧٣- حجم غلايه تجارب صغيره متر مكعب تحتوى على كجم واحد من الماء عند ضغط مطلق واحد كجم/سم٢ ودرجة حرارة ١٥°م ويشغل الهواء باقى حجم الغلايه .
احسب :
١- وزن الهواء الموجود بالغلايه مع كل كجم بخار .
٢- الضغط الكلى فى الغلايه عندما تصل درجة حرارة المخلوط الى ١٥٠°م . علما بان محبس البخار العمومى كان لايزال مغلقا .
٣- الحرارة الكليه للبخار اذا كانت جودته ٩٠٪
(اعتبر ان الثابت العام للغازات ٨ر٢٩ كجم متر/كجم °م).

٧٤- مصنع صغير لبسترة الالبان على دفعات ، به غلايتان الاولى تعمل عند ضغط مطلق مقداره ٣ كجم/سم٢ وجودة البخار الناتج ٩٠٪ والثانيه تعمل عند ضغط مطلق مقداره ٥ كجم/سم٢ وجودة البخار الناتج ٨٥٪ وللاستفادة باكبر كمية ممكنه لتسخين اللبن خلط ١٥ كجم من بخار الغلايه الاولى مع ١٠ كجم من بخار الغلايه الثانيه ونتج عن ذلك ان مخلوط البخار كان عند ضغط مطلق ٤ كجم/سم٢ .

استخدم هذا المخلوط لتسخين مقدار من اللبن من درجة حرارة ٢٠°م الى ٦٥°م ويتكثف البخار المستخدم على درجة ٣٦°م. احسب :
١- جودة البخار الناتج من عملية الخلط.
٢- كمية اللبن التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار .
علما بان $c_p = 0.93$ kcal/kg. K

٧٥- ضاغط هواء يعمل بقوة الطرد المركزيه لضغط ٣ر٠ متر مكعب من الهواء الجوى فى الدقيقه عند ضغط مطلق مقداره ١٠٣ كيلوباسكال الى ضغط مطلق مقداره ٦٨٩ كيلوباسكال.
احسب القدرة الحصانيه اللازمه لادارة الضاغط علما بان كفاءته ٧٥٪ .
اذا كان عمود الاداره يدور بسرعة ١٠٠٠ لفه فى الدقيقه واريد زيادة ضغط الهواء بالضاغط الى ٨٢٧ كيلوباسكال فما مقدار الزيادة المنتظرة فى سرعة دوران عمود ادارة الضاغط (γ = ٤ر١).

٧٦- مبادل حرارى يستخدم لتبريد ٩كجم ماء ساخن فى الساعه من درجة ٨٨^{o}م بواسطة ١٣٦٫٧ كجم ماء بارد فى الساعه عند درجة ٣٢^{o}م . فاذا كان المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحرارة بين الماء الساخن وجدار مواسير المبادل الداخليه والماء البارد يساوى ٤٤٨ كيلوكالورى/ساعه.متر^{٢}.^{o}م .
احسب:
أ- المساحه السطحيه للمواسير فى حالة استخدام :
١- مبادل متوازى .
٢- مبادل عكسى .

ب- فى حالة استخدام مبادل عكسى ، اذا تغيرت درجة حرارة دخول الماء البارد من ٣٢^{o}م الى ٢١^{o}م وبقيت درجة حرارة دخول الماء الساخن ثابته عند ٨٨^{o}م مع عدم تغيير مقدار سريان كل من الماء البارد والساخن ، احسب درجة حرارة خروج الماء البارد من المبادل (اعتبر ان المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحراره ظل ثابتا كذلك).

٧٧- جهاز بسترة يستخدم لتسخين كمية من اللبن من درجة ٢١^{o}م الى ٦٦^{o}م (الحراره النوعيه للبن ٩٣ر كيلوكالورى/كجم^{o}م) وكفاءته ٨٥٪ - فاذا كان البخار المستخدم فى التسخين هو عباره عن مخلوط من ثلاثة انواع من البخار :
الاول مقداره ١٠ كجم/ساعه بخار محمص عند ضغط مطلق ١٠ كجم/سم^{٢} ودرجة حرارة ٢٠٠^{o}م ، والثانى مقدارة ١٥ كجم/ساعه بخار جاف ومشبع عند ضغط مطلق ٨ كجم /سم^{٢} ، والثالث مقدارة ٢٥ كجم/ساعه بخار رطب عند ضغط مطلق ٥ كجم/سم^{٢} ونسبة جفافه ٧٥٪. فاذا كان الضغط المطلق للمخلوط هو ٧ كجم/سم^{٢} - احسب :

١- نسبة جفاف مخلوط البخار.
٢- كمية اللبن التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار.

٧٨- مبادل حرارى يستخدم لبسترة واحد كيلوجرام فى الدقيقه من عصير البرتقال وذلك بواسطة تكثيف بخار رطب فى الغلاف الخارجى المحيط بمواسير المبادل الحرارى . فاذا كان ضغط البخار المستخدم فى المبادل الحرارى يساوى نصف كجم/سم^2 ونسبة جفافه ٩٠٪ وطول مواسير المبادل خمسة امتار، القطر الداخلى لكل منها ٢سم والخارجى ٥ر٢ ومصنوعه من النحاس الاحمر ذو معامل انتقال حرارة بالتوصيل مقداره ٣٠٠ كيلوكالورى/متر.ساعه.^{o}م. واذا كان معامل انتقال الحرارة بالحمل لعصير البرتقال ٢٠ كيلوكالورى/متر مربع.ساعه^{o}م ، ومعامل انتقال الحراره بالحمل للبخار المستخدم ١٥ كيلوكالورى/متر مربع.ساعه ^{o}م ودرجة حرارة دخول عصير البرتقال الى المبادل ٢٥^{o}م ودرجة حرارة خروجة ٦٠^{o}م وحرارته النوعيه ٨ر. كيلوكالورى/كجم ^{o}م...
احسب :
أ - عدد مواسير المبادل الحرارى مقربه الى اقرب عدد صحيح.
ب- كمية البخار المتكثفه فى الساعه.
ج - كمية الوقود المستخدم فى الغلايه لتوليد هذا البخار اذا علمت ان القيمه الحراريه للوقود ...ر١٠ كيلوكالورى/كجم وقود وكفاءة الغلايه ٨٠٪ .

٧٩- مصنع صغير لبسترة الالبان على دفعات به غلايتان : الاولى تعمل عند ضغط مطلق مقدارة ٦ كجم/سم^2 ، وجودة البخار الناتج ٨٥٪ والثانيه تعمل عند ضغط مطلق مقدارة ٥كجم/سم^2 وجودة البخار المستخدم ٩٠٪ ، وحتى يمكن الاستفاده باكبر كفاءة ممكنه من تسخين اللبن خلط ١٠ كجم/ساعه من بخار الغلايه الاولى مع ١٥ كجم/ساعه من بخار الغلايه الثانيه ونتج عن ذلك ان مخلوط البخار كان عند ضغط مطلق مقدارة ٥ر٥ كجم/سم^2. استخدم هذا المخلوط فى تسخين كمية من اللبن من درجة ٢٠^{o}م الى ٦٥^{o}م ، ويتكثف البخار المستخدم على درجة ٤٠^{o}م . احسب :
١- جودة البخار الناتج عن عملية الخلط .
٢- كمية اللبن التى يمكن تسخينها بمخلوط البخار.

٨٠- استخدمت علب على شكل متوازى مستطيلات مقاس ٧ × ٥ر٢ × ١٥سم لتعبئة لحم اللانشون بدون ترك اى فراغ ، وكانت درجة حرارة اللحم الابتدائيه ٨٢°م ، وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته ١١٥°م لمدة ساعتين وذلك بغرض معاملة المعلبات حراريا . احسب درجة حرارة منتصف اللحم المعلب اذا علمت ان :

الحراره النوعيه للحم = ٨٤ر. كيلوكالورى/كجم.°م

كثافة اللحم = ١.٨٨ كجم/متر مكعب

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للحم = ١١ر. كيلو كالورى/ساعه.متر .°م

معامل انتقال الحراره بالنقل للبخار= ١٤٩٥ كيلو كالورى/ساعه.متر مربع.°م

٨١- استخدمت علب رقم ٢ (القطر الصافى ٨سم والارتفاع الصافى ٢٥ر١٠سم) فى تعبئة لبن مكثف ومحلى كثافته ٨٨ر. كجم/متر مكعب ودرجة حرارته الابتدائيه ٦٠°م .وضعت المعلبات فى معقم يستخدم بخار درجة حرارته ٩٣°م لمدة ساعه واحدة وذلك بغرض معامله المعلبات حراريا ، فاذا كان فراغ العلبه ٦رسم ، احسب درجة حرارة منتصف الغذاء المعلب اذا علمت ان :

الحراره النوعيه للبن المكثف = ٩٤ر. كيلوكالورى/كجم.°م

معامل انتقال الحراره بالنقل للبخار = ١٤٩٥ كيلوكالورى/ساعه .مترمربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبن المكثف = ١١ر.كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

٨٢- قطعة من اللانشون على شكل اسطوانه قطرها ٢٥ر٧سم وطولها ٧ر١٤سم وضعت فى فرن درجة حرارته ١١٥°م بغرض معاملتها حراريا ولمدة ساعتين. فاذا كانت درجة حرارة اللانشون الابتدائيه ٢١°م احسب درجة حرارة منتصف اللانشون اذا كان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لجو الفرن = ٢٩٨كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للانشون = ١٣ر.كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

الوزن النوعي للانشون =٠٧ر١

الحراره النوعيه للانشون =٨ر. كيلوكالورى/كجم.°م

٨٣- بطيخه على شكل كرة قطرها ٢٢سم ودرجة حرارتها الابتدائيه ٢٧°م ، يراد تبريدها لتصل درجة حرارتها عند المركز الى ٥ر٥ °م وذلك بوضعها فى ثلاجة درجة حرارة جوها ٢°م . احسب الوقت اللازم لذلك اذا كان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لجو الثلاجه = ٧٥ر.كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبطيخه = ١١ر.كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

الحراره النوعيه للبطيخه	= ٩ر.كيلوكالورى/كجم.°م
كثافـــة البطيخـــه	= ١٠٠١ كيلوجرام /متر مكعب

٨٤- معلب بيوريه بسلة على شكل اسطوانه قطرها ٦ر٢سم وارتفاعها ٨ر٩سم ودرجة حرارتها الابتدائيه ٣٠°م يراد معاملتها حراريا وذلك بوضعها فى وسط تسخين درجة حرارته ١١٥°م . والمطلوب تقدير درجة حرارة المنتصف لكل من الحالتين:

أ - اذا اعتبرت المعلب كاسطوانه لانهائيه.

ب- اذا اعتبرت المعلب اسطوانه محددة الارتفاع

علما بان :

معامل انتقال الحراره بالنقل لوسط التسخين=٥٢٢ كيلوكالورى/ساعه.متر مربع.°م

معامل انتقال الحراره بالتوصيل للبسلـــه = ٢٢ر.كيلوكالورى/ساعه.متر.°م

الحراره النوعيه للبسله	= ٩١ر. كيلوكالورى/كجم.°م
كثافة بيوريه البسلـــه	= ١.٨٨ كجم /م^{٣}
وقت المعامله الحراريـــه	= ٤٥ دقيقه

الباب العاشر

الهواء الرطب HUMID AIR

خواص الهواء الرطب

يحتوى الهواء الجوى على كمية من الرطوبه تختلف باختلاف درجة الهواء ومدى تعرضه للاسطح الباردة . فالهواء له خاصية حمل بخار الماء معه وتزداد هذه الخاصية كلما ارتفعت درجة حرارته ولكن عند درجة حرارة معينة نجد ان الهواء يستطيع حمل بخار الماء معه الى ان تصل كمية البخار الى حد معين لايستطيع بعدها ان يحمل الهواء مزيدا منه وهذه الحالة يطلق عليها حالة التشبع Saturation اى ان تركيز البخار قد وصل الى تركيز التشبع . فاذا ارتفعت درجة حرارة الهواء نجد ان قابليته على حمل البخار تزداد فيصبح تركيز البخار اقل بكثير من تركيز التشبع مما يتيح للهواء فرصة حمل مزيدا من البخار معه الى ان يصل الى تركيز التشبع . ولكن اذا انخفضت درجة حرارة الهواء نجد ان قابليته على حمل بخار الماء تقل وبالتالى تزداد كمية البخار به عن تركيز التشبع فيبدأ بخار الماء فى التكثف عند اللحظه التى تصل فيها درجة حرارته الى الدرجه التى يكون فيها تركيز التشبع معادل لكمية بخار الماء الموجود بالهواء وهذه الدرجة تعرف بنقطة الندى Dew Point.

ولكى نستخدم الهواء الرطب فى عمليات التصنيع المختلفه نبدأ بالتعاريف الآتيه :

الرطوبه المطلقه : Absolute Humidity

هى نسبة وزن الرطوبة (الماء) العالقه فى الهواء الرطب الى وزن الهواء الجاف ، وتستخدم عادة وحدة وزنية من الهواء الجاف(رطل او كيلو جرام) كأساس لهذه النسبه حيث انها ثابته لاتتغير بتغير حالة الهواء ، وعلى ذلك تكون وحدات الرطوبه المطلقه : رطل رطوبه/رطل هواء جاف بالوحدات الانجليزية او كجم رطوبه/كجم هواء جاف بالوحدات المتريه . وحيث ان وزن الرطوبه فى كل وحدة وزنيه للهواء الجاف تكون صغيرة الى حد ما وحتى يمكن حساب الرطوبه المطلقه من الجداول او الخرائط تستخدم عادة وحدات الجرين فى حساب كمية الرطوبه بدلا من الرطل فى الوحدات الانجليزيه والرطل يساوى ٧٠٠٠ جرين وعلى ذلك نجد ان جميع بيانات الرطوبه المطلقه يعبر عنها بوحدات جرين/رطل هواء جاف فى الخرائط بالوحدات الانجليزيه اما بالنسبه للخرائط بالوحدات المتريه أو الوحدات الدوليه فيتم التعبير عنها بوحدات كيلوجرام رطوبه لكل كيلوجرام هواء جاف.

الرطوبه النسبيه : Relative Humidity

وهى نسبة ضغط بخار الماء الموجود فى الهواء الرطب عند درجة حرارة معينه الى ضغط بخار الماء لو كان الهواء الرطب مشبعا عند نفس درجة الحرارة .

او نسبة تركيز بخار الماء بالهواء عند درجة حرارة معينه الى تركيز التشبع لبخار الماء عند نفس درجة الحراره .

درجة الحرارة الجافه : Dry Bulb Temperature (D.B.T).

هى درجة حرارة الهواء العاديه التى تقاس بترمومتر عادى.

درجة الحراره الرطبه : Wet Bulb Temperature (W.B.T).

هى درجة حرارة الهواء الناتجة عن قدرة تبخيره للماء ، وتعتمد على مقدار تشبعه ببخار الماء . ويمكن قياسها بوضع الترمومتر ذو القطن المبلل امام تيار من الهواء وتكون درجة الحرارة فى هذه الحالة هى درجة الحراره الرطبه . ومرور الهواء المحمل ببخار الماء على مستودع الترمومتر يسبب تبخر الماء الموجود بالقطن المبلل ينتج عنه انخفاض فى درجة حرارة الماء نتيجة لتبخره ، فتكون دائما درجة الحرارة الرطبة للهواء اقل من درجة حرارته الجافه وتساويها فى حالة واحده عندما يصل تركيز بخار الماء الى تركيز التشبع فى الهواء .

ويوجد عادة جهاز خاص يثبت به ترمومتران ، احدهما يغطى مستودعه بقطعه قطن مبلله لقياس درجة الحراره الرطبه ، والآخر عادى لقياس درجة الحراره الجافه . ويتصل هذا الجهاز بذراع يمكن بواسطتها تحريك الترمومتران بسرعه مناسبه وذلك عند استخدامها فى غرف او انفاق ذات هواء ساكن ويسمى هذا الجهاز Sling Psychrometer .

حجم الهواء الرطب : Humid Volume

ويمكن حسابه بدون خطأ يذكر لمجموع احجام وحدة وزنيه واحدة من الهواء الجاف وحجم بخار الماء (الرطوبة) الموجود فى الهواء الرطب .

كمية الحراره الكليه للهواء الرطب : Total Humid Heat

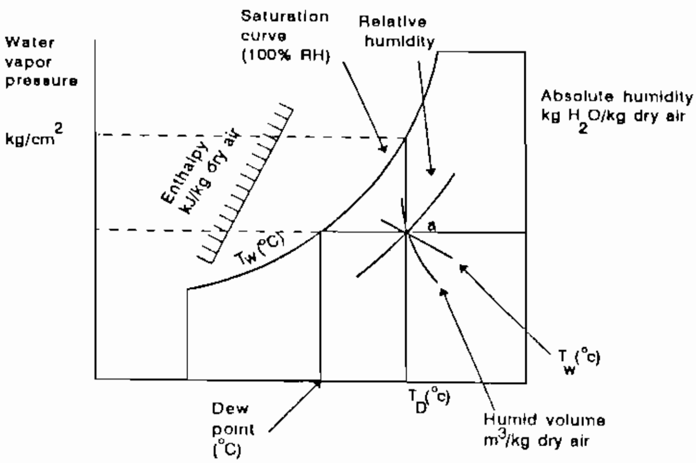
وهى عباره عن مجموع كمية الحراره الموجودة فى وحدة وزنيه واحدة من الهواء الجاف عند درجة حرارة معينه وكمية الحرارة الكامنه Latent heat لبخار الماء الموجود فى الهواء الرطب عند نفس درجة الحراره .

وجميع هذه الخواص مبينه على الخريطه السيكرومتريه Psychrometric Chart فى صوره خاصه يمكن بها حساب كمية الرطوبه مثلا الموجودة فى وحدات التصنيع المختلفه (مثل المجففات او غرف التخزين بالتبريد) ويمكن الاستعانه بهذه الخريطه لتحديد حالة الهواء الرطب داخل وحدات التصنيع اذا عرفت خاصيتين من خواص هذا الهواء .

وعادة تستخدم درجتى الحرارة الجافه والرطبه لتحديد حالة الهواء وذلك لسهولة قياسها .

طريقة استخدام الخريطة السيكرومتريه :

لنفرض اننا استخدمنا جهاز Sling Psychrometer فى قياس درجات حرارة هواء غرفة تخزين بالتبريد مثلا . وكانت درجة الحرارة الجافه لهواء الغرفه ٢٠°م ودرجة الحرارة الرطبه للهواء ١٥°م ، فانه يمكن تحديد حالة الهواء داخل غرفه التخزين على الخريطة السيكرومتريه بالنقطة " "a فى الشكل (١٠-١) :



شكل (١٠-١) الخريطة السيكرومتريه

وهى عباره عن تقاطع الخط الرأسى الممثل لدرجة الحرارة الجافه مع الخط المائل الذى يمثل درجة الحراره الرطبه ، وعلى ذلك يمكننا قراءة الخواص الاخري لحالة الهواء الرطب الممثله بالنقطه " a" ونجدها كالآتى :

الرطوبه المطلقـــه = ٨٧..ر. كجم رطوبه/كجم هواء جاف
كمية الحرارة الكليه = ٤٢ كيلو جول/كجم هواء جاف

ونلاحظ ان الخط الدال على كميـة الحراره ينطبق تقريبا مع الخط المائل الذى يمثل درجة الحراره الرطبه ، فاذا امتد هذا الخط حتى يتقاطع مع مقياس كمية الحراره الكليه يمكن قراءتها مباشرة من هذا المقياس .

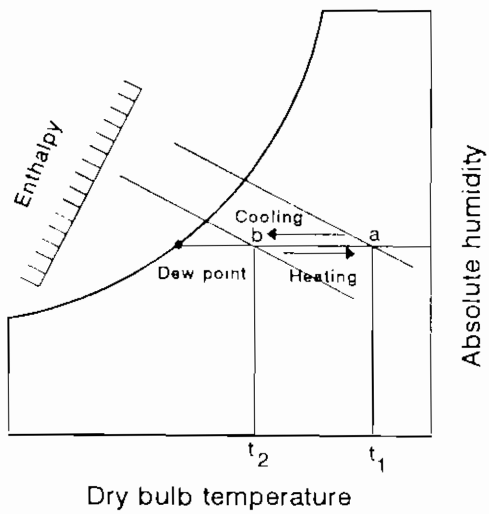
ويمكن الحصـول على نقطة الندى لحالة الهـواء المذكـور وذلك بمد الخط الافـقى الذى يمر بالنقطه " a " حتى يقطع منحنى التشبع ، ونجد انها تكون ١٢°م.

الحجم الرطب = ٨٤ر. مترمكعب/كجم هواء رطب
الرطوبه النسبيه = ٦٠٪

العمليات المختلفه التى قد تحدث للهواء اثناء اجراءات التصنيع

أولا : التبريد والتسخين :

يمكن تمثيل التبريد والتسخين الذى قد يحدث فى هواء غرفة تخزين مثلا ، محكمة الغلق وبدون تغيير فى كمية الرطوبة داخلها بخط افقى مستقيم على الخريطة السيكرومتريه من حالة الهواء " a" الى الحاله "b" كما هو مبين فى الشكل (١٠-٢) :

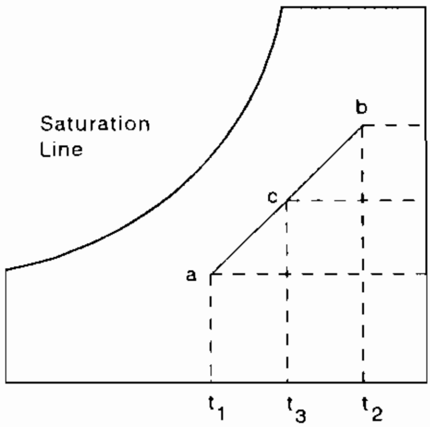


شكل (١٠-٢) تمثيل اجراء التسخين والتبريد على الخريطة السيكرومتريه

وتكون كمية الحرارة المزاله (تبريد) او المكتسبه (تسخين) تساوى الفرق بين كمية الحرارة الكليه فى الحالتين "a" , "b" وفى حالة تبريد هواء الغرفه يجب مراعاة عدم خفض درجة حرارتها عن درجة حرارة انابيب المبخر والا قد يحدث تكثيف لرطوبة الهواء على الانابيب او بعبارة اخرى يجب عدم خفض درجة حرارة هواء غرفة التخزين عن درجة حرارة نقطة الندى كما هو مبين فى الشكل السابق .

ثانيا : خلط الهواء :

عادة مايتسرب هواء من خارج غرفة التخزين الى داخلها عن طريق عدم احكام غلق باب الغرفه او نتيجة فتح الباب لتحميل الغرفه او تفريغها ، وبذلك تختلط كمية من الهواء الخارجى مع هواء الغرفه ويتسبب عن ذلك تغير فى الرطوبه المطلقه ودرجة حرارة هواء الغرفه . نفرض ان حالة كمية الهواء الداخلى تمثلها النقطه "a" على الخريطة السيكرومتريه كما هو مبين فى الشكل (١٠-٣) :



شكل (١٠-٣) تمثيل خلط الهواء الرطب على الخريطة السيكرومترية

النقطه "b" تمثل حالة الهواء المتسرب الى داخل الغرفه ، فتحدث عملية الخلط على الخط الذى يصل بين النقطتين "a" ، "b" وحتى تسهل طريقة الحسابات ، نعتبر ان هذا الخط يكون مستقيما تقريبا بدون خطأ يذكر .

ولتحديد حالة الهواء الجديده بعد الخلط ناخذ فى الاعتبار مايأتى :

١- وزن الهواء المخلوط يساوى مجموع اوزان الهواء المتسرب الى الغرفه وهواء الغرفه .

٢- كمية الرطوبه فى الهواء المخلوط تساوى مجموع كمية الرطوبه فى الهواء داخل الغرفه وكمية الرطوبه فى الهواء المتسرب .

أى ان :

وزن الهواء المخلوط = وزن هواء الغرفه + وزن الهواء المتسرب.
وزن الهواء المخلوط × رطوبته المطلقه = وزن هواء الغرفه × رطوبته المطلقه
+ وزن الهواء المتسرب × رطوبته المطلقه.

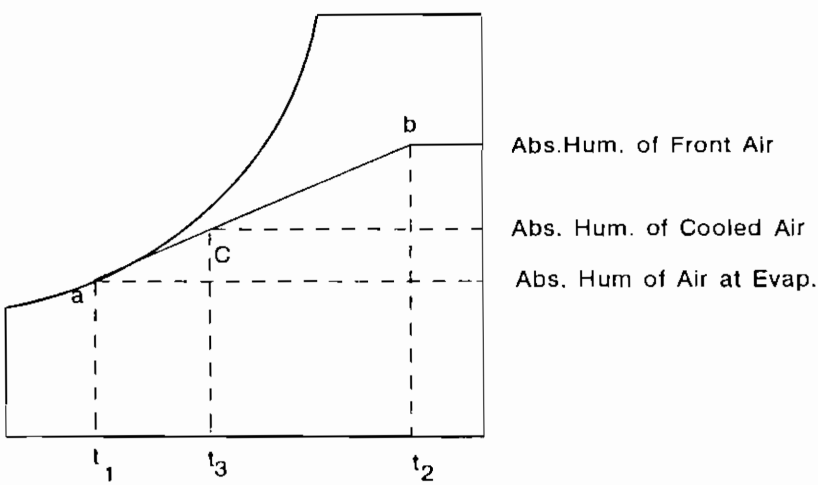
ومن المعادلتين السابقتين نجد أن :

الرطوبه المطلقه للهواء المخلوط =

$$\frac{\text{وزن هواء الغرفه} \times \text{رطوبته المطلقه} + \text{وزن الهواء المتسرب} \times \text{رطوبته المطلقه}}{\text{وزن هواء الغرفه} + \text{وزن الهواء المتسرب}}$$

وبذلك يمكننا حساب الرطوبه المطلقه للهواء المخلوط ونرسم عندها خط أفقى مستقيم نمده الى ان يقطع الخط "a b" فى النقطه "c" وبذلك تتحدد درجة حرارة هواء الغرفه بعد عملية الخلط كما هو موضح فى الشكل السابق .

ثالثا : التبريد والترطيب :



شكل (١٠-٤) تمثيل التبريد والترطيب على الخريطة السيكرومتريه

تشبه هذه العمليه الي حد كبير عملية خلط الهواء ، فعادة ماتزود غرف التخزين بمراوح لتقليب الهواء حتى تكون درجة حرارة الغرفه ثابته . فاذا فرض ان t_2 هى درجة الحراره الجافه للهواء الموجود امام مروحة التقليب عند بدء تشغيل وحدة التبريد، وأن درجة حرارة الهواء الملامس لانابيب المبخر تكون t_1 (نقطة الندى) وبذلك تقع درجة الحراره الجافه للهواء المبرد على الخط المستقيم a b الواصل بين الحالتين وتمثلها (c) كما هو مبين فى الشكل (١٠-٤) .

أى انه يمكن القول ان جزء من هواء الغرفه يبرد ويصل الى درجة حرارة سطح مواسير المبخر t_1 والجزء الآخر يكون عند درجة الحرارة الجافه t_2 ونتيجة لخلط هذين الجزءين ببعضهما تصل درجة الحرارة الجافه لهواء الغرفه الى t_3 ، ونطبق عليها نفس خطوات الحسابات الخاصه بخلط الهواء التى سبق شرحها .

وتعرف درجة اداء عملية التبريد والترطيب على هذا النحو بما يسمى عامل التمرير By Pass Factor وتوجد قيمته كالآتى :

$$\text{By Pass factor} = \frac{t_3 - t_1}{t_2 - t_1} = \frac{30 - 20}{45 - 20} = \frac{10}{25} = 0.4 \qquad (10\text{-}1)$$

عامل التمرير =

$$\frac{\text{الرطوبه المطلقه للهواء المبرد} - \text{الرطوبه المطلقه للهواء الملامس لسطح المبخر}}{\text{الرطوبه المطلقه للهواء امام المروحه} - \text{الرطوبه المطلقه للهواء الملامس لسطح المبخر}}$$

ويمثل عامل التمرير الجزء الذى مر من الهواء الملامس لسطح انابيب المبخر مع الهواء الموجود امام مروحة التقليب .

الباب الحادى عشر

التجفيف

DRYING OR DEHYDRATION

حفظ الاغذيه بالتجفيف

التجفيف Drying أو التنشيف Dehydration هو عبارة عن عملية ينتج عنها خفض المحتوى الرطوبى للمادة نتيجة لتبخر الماء منها وبالتالى تركيز ما تحتوى عليه من المكونات الصلبه الذائبه وبذلك يمكن حفظها لفترات طويله دون خوف من سرعة تعرضها للتلف حيث انه كلما كانت نسبة الرطوبه بالمادة مرتفعه كلما كانت مجال خصب لنمو الكائنات الدقيقه ونشاط الانزيمات .

وصناعة التجفيف تعتبر من اكثر الصناعات الغذائيه ممارسة واهمية ، فهى من الصناعات القديمة التى ادت الحاجة الطبيعيه للانسان لقيامها . وقد كانت عملية التجفيف - ومازالت فى كثير من الاحيان - تتم طبيعيا بتعريض المادة المراد تجفيفها للشمس والهواء لخفض نسبة الرطوبة بها كما هى الحالة فى تجفيف البلح او العنب وبعض الخضروات . وقد استحدثت عملية التجفيف الصناعى نظرا لانه يمكن فيها التحكم فى العوامل المؤثره على المادة المجففه مثل سرعة الهواء والتحكم فى درجة حرارته ونسبة رطوبته .

ويشترط فى تجفيف الاغذية المحافظة على مركباتها بدون أى تلف او تحلل اثناء عملية التجفيف او اثناء تخزين المواد المجففه ، كما يشترط فى الماده الغذائيه الجافه سرعة تشربها ثانية للرطوبه عند نقعها فى الماء حتى تسترجع اكبر قدر ممكن عمليا من صفات وخواص مادتها الطازجة .

وعملية تجفيف المنتجات الزراعيه والغذائيه تعتبر ذات أهمية كبيرة فى الحفظ لاتقل اهمية عن طرق الحفظ الاخرى مثل التبريد أو التجميد بل تفوقها فى بعض الاحيان خاصة اثناء الحروب . واهم مميزات الاغذية المجففه :

١- ارخص طرق الحفظ لانخفاض تكاليف الانتاج والعبوات وعدم الحاجه الى اضافة مواد حافظه اخرى او تخزينها فى غرفة التبريد .
٢- انخفاض تكاليف النقل والشحن والتخزين نتيجة لقلة وزنها وحجمها .
٣- تواجد الاغذية المحفوظة بالتجفيف على مدار السنه .
٤- يمكن الاحتفاظ باكبر قدر ممكن من صفات المواد الغذائية الطازجة وذلك طالما كان هناك عناية كافيه فى تصنيعها وتخزينها .

الخطوات الرئيسيه فى تحضير ثمار الفاكهه والخضر للتجفيف :

١- انتخاب اصناف الفاكهه والخضر التامة النضج اذ ان تجفيف الثمار الغير تامه النضج يتسبب عنها لون غير مغرى ومذاق غير مستحب وانكماش ظاهر فى شكلها الخارجى .

٢- العنايه بقطف ثمار الفاكهه حتى لايتسبب ذلك فى قلة جودتها .

٣- مراعاة انتخاب اصناف الفاكهه والخضر التى بها نسبة مرتفعه من المواد الصلبه. اى نسبة الرطوبه بها قليله وبذلك يمكن زيادة نسبة التجفيف وتقليل كمية الماء الواجب تبخيرها من المادة الطازجه .

٤- مراعاة الصفات الخاصه فى الثمار التى تحدد جودة المنتجات المجففه مثل ارتفاع نسبة الكاروتين فى الجزر والبطاطا ونسبة فيتامين C فى الفواكه وانخفاض نسبة السكريات المختزله وما اليها من صفات مشابهه .

٥- مراعاة عدم تلف الثمار فى الفترة بين جمعها وتجفيفها ، فبعض الخضروات تتعرض للتلف بسرعة بمجرد حصادها ، لذلك يجب نقلها وتجفيفها فى اقصر وقت ممكن . وكثير من ثمار الفاكهه يمكن تخزينها داخل غرف تبريد اثناء هذه الفترة حتى يتم تجفيفها .

٦- تغسل جميع الخضروات وخاصة الجذرية منها غسلا جيدا لازالة الأتربه والمواد العالقه بها . ولاينصح بغسل الفاكهه الا اذا كانت معاملة باحدى المواد المبيدة للحشرات أو اذا جمعت من الارض .

٧- لتسهيل عملية التجفيف ولانتاج فواكه او خضر مجففه ذات مظهر افضل ومذاقا احسن تتم عمليات الفرز والتنظيف والتقطيع وازالة النقى والتقشير. وتتم عملية التقشير للخضروات الجذريه وبعض انواع الفاكهه كالتفاح والخوخ اما بواسطة آلات التقشير بالاحتكاك كما فى البطاطس والبطاطا ، او بالمحاليل القلويه كما فى الخوخ .

٨- الغمر بالقلوى : Dipping

تغمرثمار الفاكهه قبل عملية التجفيف فى محلول قلوى مثل الصودا الكاويه ٥ . ٠٪ وذلك لازالة الاتربه الملتصقه بالثمار ، والطبقة الشمعيه الموجودة على سطحها مع تليين قشور الثمار وتشقيقها حتى تسهل عملية تبخير الماء من الثمار .

٩- الكبرتـــــه : Sulfuring

والمقصود بهذه العملية هو معامله المادة المعده للتجفيف بغاز ثانى اكسيد الكبريت واهم اغراض هذه العمليه مايأتى :-

أ - ايقاف عمل الانزيمات خاصة المؤكسدة .
ب - تمنع اكسدة سطح الثمار بالهـــواء .
جـ - تساعد على المحافظة على اللون والطعم الطبيعى للفاكهه او الخضر .
د - تساعد على استخدام درجات حرارة عاليه فى عملية التجفيف .
هـ - تأخر معدل فقد الفيتامينات خاصة فيتامين أ ، جـ .
و - اطالة مدة التخزين نتيجة لتأثير غاز ثانى اكسيد الكبريت على نشاط الاحياء الدقيقه .

١٠- التبخير : Fumigation

تبخر الفاكهه كالبلح ومعظم الخضروات قبل او بعد عملية التجفيف للتخلص من الآفات الحشريه .

نظرية التجفيف الصناعى

عندما تتعرض الماده المراد تجفيفها للجو يفقد السطح المبلل لهذه المادة كميـــة كبيره من رطوبته وذلك نتيجة لتبخر الماء منه . وحيث ان عملية تبخير الماء يلزم لها اضافة كمية حرارة كافية لاتمامها فاننا نجد ان عملية التجفيف ينتج عنها الآتى :

١- انخفاض نسبة الرطوبه فى سطح المادة المعرضه للجو نتيجة لتبخر الماء منها .

٢- انخفاض فى درجة حرارة سطح الماده وذلك لامتصاص كمية الحرارة منها لاحداث التبخير .

٣- ارتفاع تركيز بخار الماء فى الجو المحيط بسطح المادة .

٤- انخفاض معدل التبخير كنتيجة للآتى :

أ - انخفاض نسبة الرطوبه بسطح الماده المعرضه للجو يؤدى الى الاقلال من معدل التبخير .

ب- انخفاض درجة حرارة السطح المعرض وعلى ذلك ينخفض معدل التبخير كنتيجة لصعوبة الحصول على الحرارة الكافيه منه لاحداث التبخير .

جـ- وجود طبقة راكده من الهواء على سطح المادة يتسبب عنها مقاومه مرور الرطوبه من داخل المادة الى الجو الخارجى اى انه يسبب تشبع سطح المادة ببخار الماء .

وحيث ان عملية التجفيف الصناعى تتحكم اساسا فى سرعة مرور الهواء على السطح الخارجى وخلال انسجة المادة المراد تجفيفها ، وكذلك يتحكم فى درجة حـــرارة ونسبة رطوبة الهواء ، فانه يمكن الاقلال من انخفاض معدل التبخيـــر بواسطـــة التجفيف الصناعى وذلك كما يأتى :-

١- تزود المجففات الصناعيه بالطاقه الحرارية اللازمه للتجفيف عن طريق التسخين المباشر (حرق الوقود مباشرة فى المجففات) او الغير مباشر (كأستخدام مبادلات حرارية يمر بداخلها بخار وخارج اسطحها هواء التجفيف) وينتج عن ذلك ارتفاع درجة حرارة السطح المعرض للمادة وبذلك يسهل انتقال الحرارة من الجو الملامس للمادة الى داخلها وبالتالى يرتفع معدل التبخير منها. ويجب مراعاة عدم رفع درجة حرارة الهواء الى الحد الذى ينتج عنه ضرر للمادة المراد تجفيفها . غير انه يمكن استخدام درجات حرارة اعلى لهواء التجفيف فى حالة ما اذا كانت اسطح المواد المراد تجفيفها بها نسبة عالية من الرطوبه .

٢- تستخدم مراوح لدفع هواء التجفيف داخل المجففات وبذلك تكون سرعة الهواء مرتفعه يتسبب عن ذلك ازاحة تيارات الهواء الساخن لطبقة الهواء المشبعه ببخار الماء الراكده على اسطح المادة المراد تجفيفها والتى تقاوم تبخير الرطوبه من داخل المادة نفسها ، ويختلف سمك الطبقة الراكدة باختلاف سرعة الهواء المستخدمه . فكلما كانت السرعة بطيئة كلما كان سمك هذه الطبقة كبيرة ويقل هذا السمك بازدياد سرعة الهواء كذلك يجب ان يكون الهواء المار داخل المجففات به نسبة منخفضة من الرطوبه حتى يزيد من قدرته على امتصاص كمية كبيرة من الرطوبه .

وتتم عملية التجفيف على مرحلتين :

١- المرحله الاولى وتعرف بمرحلة معدل التبخير الثابت :
Constant Rate Period :

فأى مادة بها كمية من الرطوبه ، يوجد عادة على سطحها طبقة ذات سمك صغير من الماء . وازالة هذه الطبقه بالتجفيف يماثل تماما تبخير الماء من سطح اناء محتوى على ماء ومعرض للهواء الساخن . والمدة اللازمه للانتهاء من المرحله الاولى تعتمد مباشرة على سمك طبقة الماء على سطح المادة وتكون هذه المدة قصيره . والمحتوي الرطوبي للماده الذى تصل اليه بعد المرحله الاولى يعرف بالمحتوى الرطوبى الحرج Critical Moisture Content (M_C) وبعده تبدأ عملية التجفيف فى المرحله الثانيه .

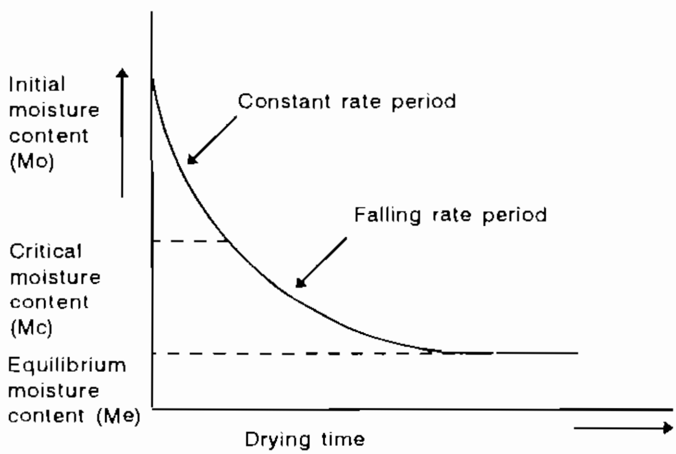
٢- المرحله الثانيه وتعرف بمرحلة معدل التبخير المتناقص :
Falling Rate Period :

وتتم هذه المرحله على الوجه التالى :

أ - تحرك الرطوبه (الماء) داخل المادة المراد تجفيفها الى ان تصل الى السطح الخارجى .

ب- ازالة هذه الرطوبه من السطح الخارجى .

والتحرك الداخلى للرطوبه فى المواد الغذائيه (سواء بها خلايا وانسجة تجعلها مساميه) يماثل تحرك السوائل فى الانابيب الشعريه او تحركها بالجاذبيه مثل تحرك المياه الجوفيه فى الاراضى المساميه . واذا كان المحتوى الرطوبى للمادة اقل من درجة التشبع يكون تحرك الرطوبه بطريقة الانتشار Liquid Diffusion



شكل (١١-١) منحنى التجفيف

والرسم البيانى شكل (١١-١) يمثل العلاقه بين المحتوى الرطوبى للمادة المراد تجفيفها والزمن الذى تستغرقه عملية التجفيف خلال مروره بمرحلتى التجفيف المذكورتين ، ونلاحظ ان المحتوى الرطوبى للمادة لايقل عن حد معين مهما طالت مدة التجفيف حيث يكون عندها ضغط بخار الماء داخل المادة فى حالة اتزان كامل مع ضغط بخار الماء الموجود فى هواء التجفيف ويسمى بالمحتوى الرطوبى المتوازن Equilibrium Moisture Content (M_e).

الحسابات الخاصه بالتجفيف

تعاريف :

تعتبر كمية المياه المتشربه فى الماده الغذائيه من أهم المهام الرئيسيه لإجراء عملية التجفيف لخفضها . ويعبر عن ذلك بالمحتوى الرطوبى للمادة أما منسوبا للوزن الكلى الرطب أو الوزن الجاف فقط ويسمى في هذه الحاله كذلك بنسبة الرطوبه فى المادة كما يلى :

المحتوى الرطوبى للماده على الأساس الرطب :

Moisture content, wet basis % (m)

ويرمز لها بالرمز m ، وهى النسبه بين وزن الرطوبه بالمادة والوزن الكلى للماده أى ان :

$$m = \frac{W_m}{(W_m + W_d)} \times 100 \qquad (11\text{-}1)$$

حيث :

W_m = وزن الرطوبه بالماده

W_t = الوزن الكلى للمادة = $W_m + W_d$

W_d = الوزن الجاف للمادة Weight of bone-dry material

المحتوى الرطوبى للمادة على الأساس الجاف:

Moisture content, dry basis, % (M)

ويرمز له بالرمز M ، وهى النسبه بين وزن الرطوبه بالمادة والوزن الجاف تماما للمادة وعادة ماتسمى نسبة الرطوبه فى المادة Moisture Ratio .

$$M = \frac{W_m}{W_d} \times 100 \qquad (11\text{-}2)$$

والعلاقه الآتيه تربط المحتوى الرطوبى على الاساس الرطب والمحتوى الرطوبى على الاساس الجاف

$$M = \frac{100m}{100 - m} \qquad (11\text{-}3)$$

ويفضل عند عمل حسابات التجفيف استخدام المحتوى الرطوبى على الاساس الجاف (M) اذ انه منسوب الى الوزن الجاف تماما بالمادة وهو ثابت لايتغير اثناء عملية التجفيف بعكس المحتوى الرطوبى على الاساس الرطب (m) فهو منسوب الى الوزن الكلى للمادة وهو يعتبر كمية متغيره يتغير اثناء فترة التجفيف وحسب درجته .

حساب كمية الرطوبه الواجب التخلص منها بالتجفيف :

ويمكن حساب كمية الرطوبه التى يجب التخلص منها بالتجفيف وذلك باستخراج المحتوى الرطوبى أولا قبل عملية التجفيف ثم المحتوى الرطوبى بعد عملية التجفيف ويكون الفرق بينهما يساوى كمية الرطوبه الواجب طردها منسوبه الى الوزن الجاف تماما للمادة. ولما كانت هذه الطريقه مطوله فقد استخرجت بعض المعادلات التى يمكن بواسطتها ايجاد وزن الرطوبه الواجب طردها مباشرة وهذه المعادلات هى :

١- وزن الرطوبه الواجب ازالتها (تبخيرها) من وحدة وزنيه واحده من الماده الطازجه:

$$\frac{\text{Weight of moisture}}{\text{Weight of fresh material}} = \frac{M_1 - M_2}{100 + M_1} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_2} \qquad (11\text{-}4)$$

حيث (1) يرمز للحاله قبل اجراء عملية التجفيف ، (2) يرمز للحاله بعد اجراء عملية التجفيف .

٢- وزن الرطوبه الواجب ازالتها (تبخيرها) للحصول على وحدة وزنيه واحدة من المادة المجففه :

$$\frac{\text{Weight of moisture}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{M_1 - M_2}{100 + M_2} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_1} \qquad (11\text{-}5)$$

٣- تقدير نسبة التجفيف Drying Ratio

وهى وزن المادة الطازجه اللازمه لانتاج وحدة وزنيه واحدة من الماده المجففه :

$$\text{Drying Ratio} = \frac{\text{Weight of fresh material}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{100 - m_2}{100 - m_1} = \frac{100 + M_1}{100 + M_2} \qquad (11\text{-}6)$$

ولحساب معدل التجفيف فى اجراء عملية التجفيف ذو الطبقه الرقيقه Thin-layer يوجد بعض المعادلات التى تستخدم لهذا الغرض ونذكر منها :

a- Lewis equation (General exponential equation)

وهى معادله آسيه تحتوى على معامل واحد وتسمى ايضا one term model أو time based model أو logarithmic model

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp.(-\alpha t) \qquad (11\text{-}7)$$

وبصيغة اخرى

$$MR = \quad -\ln MR = \alpha t \qquad (11\text{-}8)$$

حيث :

M = المحتوى الرطوبى بعد فترة من زمن التجفيف ، kg H_2O/kg DM

M_e = المحتوى الرطوبى الاتزانى ، kg H_2O/kg DM

M_o = المحتوى الرطوبى الابتدائى(عند بداية عملية التجفيف) kg H_2O/kg DM

t = وقت التجفيف ، .min

α = ثابت الانتشار الكلى drying rate parameter, min^{-1}

ويعتبر هذا النموذج ان عملية التجفيف تتم بالانتشار وتكون المقاومه للانتشار على سطح المادة المراد تجفيفها .

b- Page equation

وهى معادلة آسيه تحتوى على معاملين وهى اكثر دقه لحساب معدل التجفيف (MR) عن المعادله السابقه وتسمى Two terms model

$$MR = \frac{M - M_e}{M_o - M_e} = \exp.(-Kt^N) \qquad (11\text{-}9)$$

وبصيغه اخرى لتعطى معادله على صورة خط مستقيم

$$\ln[-\ln(MR)] = \ln K + N \ln t \qquad (11\text{-}10)$$

حيث :

K = ثابت التجفيف التجريبى ويعتبر interceptمعادله Page , min^{-1}

N = ثابت تجريبى ويعتبر ميل Slopeمعادله Page، لابعدى dimensionless

وتصف هذه المعادله معدل فقد الرطوبه اثناء التجفيف بالطبقه الرقيقه Thin-layer للماده الغذائيه .

٤- كمية الحراره اللازمه لتسخين الهواء (Q)

أو (كمية الحراره التى يكتسبها الهواء فى وحدة الزمن) =

معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن X [(المحتوى الحرارى للهواء عند النقطه (٢) / الحجم الرطب للهواء عند النقطه (٢)) − (المحتوى الحرارى للهواء عند النقطه (١) / الحجم الرطب للهواء عند النقطه (١))]

$$Q = \dot{V} \times \left(\frac{H_2}{v_2} - \frac{H_1}{v_1} \right) \qquad (11\text{-}11)$$

أو

معدل السريان الوزنى للهواء فى وحدة الزمن X [المحتوى الحرارى للهواء عند النقطه (٢) − المحتوى الحرارى للهواء عند النقطه (١)]

$$Q = \dot{m} \times (H_2 - H_1) \qquad (11\text{-}12)$$

٥- كمية الرطوبه المزاله فى وحدة الزمن (W)=

معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن X [(المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطه (٣) / الحجم الرطب للهواء عند النقطه (٣)) − (المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطه (٢) / الحجم الرطب للهواء عند النقطه (٢))]

$$W = \dot{V} \times \left(\frac{X_3}{v_3} - \frac{X_2}{v_2} \right) \qquad (11\text{-}13)$$

أو

معدل السريان الوزنى للهواء فى وحدة الزمن X [المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطه (٣) − المحتوى الرطوبى للهواء عند النقطه (٢)]

$$W = \dot{m} \times (X_3 - X_2) \qquad (11\text{-}14)$$

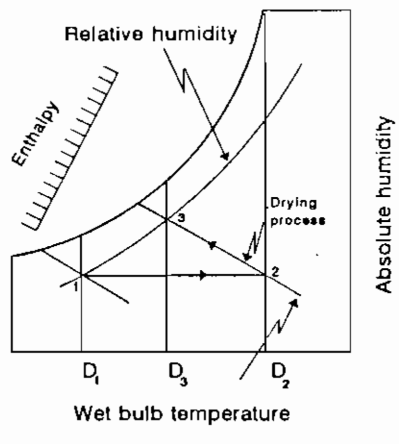
$$\text{Drying time} = \frac{\text{Total moisture to be removed}}{\text{Moisture removed per unit time}} \qquad (11\text{-}15)$$

$$\text{Heat energy required for the heating process} = \frac{\text{Total heat required to heat the air}}{\text{Conversion factor of heat energy to electrical energy}} \quad (11\text{-}16)$$

تمثيل عملية التجفيف على الخريطه السيكرومتريه :

عند مرور الهواء الجوى داخل مجفف يتم تسخينه اى رفع درجة حرارته الى درجةالحراره المناسبه لاجراء عملية التجفيف ويمر بعد ذلك الهواء الساخن على سطح المادة الرطبه المراد تجفيفها فيعمل على تبخير الماء منها ويتصاعد بخار الماء ويختلط بالهواء وفى نفس الوقت نجد أن الهواء يفقد كمية من حرارته وبالتالى تنخفض درجة حرارته الجافه . ولما كانت قدرة تشبع الهواء ببخار الماء تقل كلما قلت درجة حرارته فاننا نجد أن الرطوبه النسبيه للهواء تزداد حتى تصل الي تركيز التشبع اى اننا نجد ان معدل التجفيف يكون سريعا أولا ثم يقل تدريجيا حتى يصل الى حد معين يبدأ فى التدهور سريعا بعدها حتى ينعدم نهائيا عند تركيز التشبع .

وبذلك تظل درجة حرارة الهواء الرطبه ثابته تقريبا اثناء مرور الهواء داخل المجفف على سطح المادة المراد تجفيفها بينما تنخفض درجة حرارته الجافه حتى تتساوى مع درجة الحراره الرطبه عند تركيز التشبع . وعمليا يخرج الهواء بعد مروره على سطح الماده المراد تجفيفها على درجة حرارة مرتفعه عن درجة حرارة الهواء الخارجى ورطوبة نسبيه عاليه نتيجة لتبخر الرطوبه من المادة المجففه ، وعلى ذلك يمكن خلط كمية من الهواء الخارج من المجفف مع الهواء الجوى الداخل الى مسخن المجفف لزيادة كفاءة عملية التجفيف مع توفير فى الحراره المضافه فى مسخن المجفف وتسمى هذه الطريقه باعادة تمرير هواء التجفيف Recirculation.



شكل (١١-٢) تمثيل عملية التجفيف على الخريطة السيكرومتريه

وتمثل النقطه (a) حالة الهواء الجوى قبل دخوله الى مسخن المجفف عند درجة حرارة جافه D_a ، والنقطه (b) تمثل حالة الهواء بعد خروجه من مسخن المجفف عند درجة حرارة جافه D_b وتتم عملية التسخين a-b داخل مسخن المجفف بدون تغير فى المحتوى الرطوبى للهواء ويمر الهواء بعد تسخينه ووصوله الى نقطة b على سطح المادة المراد تجفيفها وتتم عملية التجفيف تحت درجة حرارة رطبه ثابته ويخرج الهواء بعد اتمام عملية التجفيف من المجفف عند النقطه C وتكون درجة حرارته D_c اقل من درجة حرارته عند بدء عملية التجفيف D_b.

ويمثل المثال الآتى طريقة استخدام الخريطه السيكرومتريه فى الحسابات الخاصه بالتجفيف :

مثال :

مجفف صوانى يستخدم ٣٤٠ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه ، عند درجة حرارة ٥٠°م لتجفيف شرائح من البصل من محتوى رطوبى ٩٠٪ الى محتوى رطوبى ٤٪ومقدارماينتجه من البصل المجفف يوميا ٢٢٥ كيلوجرام ، فاذا كان الهواء يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه ٢٧°م ورطوبة نسبيه ٦٠٪ ويسخن إلى درجة حرارة ٥٠°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه قدرها ٤٠°م . احسب:

١- نسبة الرطوبه فى المادة قبل وبعد التجفيف.
٢- وزن البصل قبل عملية التجفيف.
٣- كمية الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوى .
٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف .

الحل

١- نسبة الرطوبه قبل عملية التجفيف (M_1)

$$M_1 = \frac{100\ m_1}{100 - m_1} = \frac{100 \times 90}{100 - 90} = 900\%$$

نسبة الرطوبه بعد عملية التجفيف (M_2)

$$M_2 = \frac{100\ m_2}{100 - m_2} = \frac{100 \times 4}{100 - 4} = 4.170\%$$

$$2\text{-}\ \frac{\text{Weight of fresh material}}{\text{Weight of dried material}} = \frac{100 - m_2}{100 - m_1} = \frac{100 - 4}{100 - 90} = \frac{96}{10} = 9.6$$

or

$$= \frac{100 + M_1}{100 + M_2} = \frac{100 + 900}{100 + 4.17} = \frac{1000}{104.17} = 9.6$$

$\therefore$ Weight of fresh onion = 225 x 9.6 = 2160 kg/day

$$3\text{-Weight of bone dry matter} = \text{weight of dried material} \times \left(\frac{100 - m_2}{100}\right)$$

$$= 225 \times \left(\frac{100 - 4}{100}\right) = 216 \text{ kg/day}$$

$\therefore$ Weight of moisture to be removed = Weight of bone dry matter x $(M_1 - M_2)$

$$= 216 \times \left(\frac{900 - 4.17}{100}\right) = 1935 \text{ kg/day}$$

اويمكن حسابها كالآتى :

$$\frac{\text{Weight of moisture to be removed}}{\text{Weight of fresh material}} = \frac{m_1 - m_2}{100 - m_2} = \frac{90 - 4}{100 - 4} = \frac{86}{69} = 0.896$$

$\therefore$ Weight of moisture to be removed = 2160 x $\left(\frac{86}{96}\right)$ = 1935 kg/day

من الخريطه السيكرومتريه نوجد المعلومات الآتيه :

الرطوبه المطلقه للهواء الداخل الى المجفف عند النقطه (a) = ۰.۰۱۳ كجم ماء/كجم هواء جاف

الرطوبه المطلقه للهواء الخارج من المجفف عند النقطه (c) = ۰.۰۰۲ كجم ماء/كجم هواء جاف

الحجم الرطب للهواء الداخل الى المجفف عند النقطه (a) = ۰.۸۷ متر مكعب/كجم هواء جاف

الحجم الرطب للهواء الخارج من مسخن المجفف عند النقطه (b) = ۰.۹۳٥ متر مكعب/كجم هواء جاف

الحجم الرطب للهواء الخارج من المجفف عند النقطه (c) = ۰.۹۱ متر مكعب/كجم هواء جاف

الحراره الكليه فى الهواء الداخل الى المجفف عند النقطه (a) = ٦١ كيلو جول/كجم هواء جاف

الحراره الكليه فى الهواء الخارج من المجفف عند النقطه (c) = ٨٥ كيلو جول/كجم هواء جاف

٤- كمية الحراره المضافه = معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن ×

$$\left[\frac{(\text{المحتوى الحرارى للهواء})_b}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_b} - \frac{(\text{المحتوى الحرارى للهواء})_a}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_a} \right]$$

$$4- \qquad Q = \dot{V} \times \left(\frac{H_b}{v_b} - \frac{H_a}{v_a} \right) = 340 \times \left(\frac{85}{0.935} - \frac{61}{0.87} \right) = 7070.01 \text{ kJ/min}$$

كمية الرطوبه المزاله فى الدقيقه = معدل السريان الحجمى للهواء فى وحدة الزمن ×

$$\left[\frac{(\text{المحتوى الرطوبى للهواء})_c}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_c} - \frac{(\text{المحتوى الرطوبى للهواء})_b}{(\text{الحجم الرطب للهواء})_b} \right]$$

$$W = \dot{V} \times \left(\frac{X_c}{v_c} - \frac{X_b}{v_b} \right) = 340 \times \left(\frac{0.02}{0.91} - \frac{0.013}{0.87} \right) = 2.39 \text{ kg/min}$$

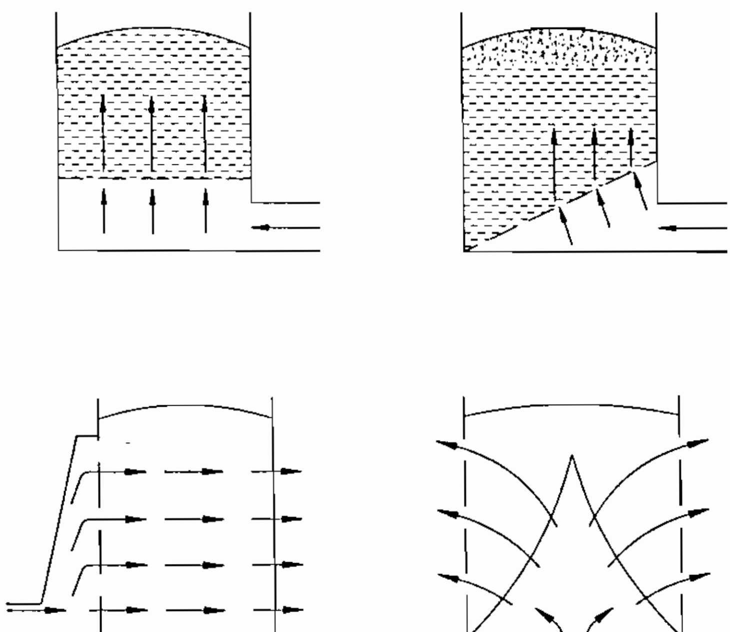
$$5- \text{ Drying time } = \frac{\text{Total evaporated moisture}}{\text{Moisture removed per hour}} = \frac{1935}{1.39 \times 60} = 13.5 \text{ hrs.}$$

أنواع المجففات

توجد تصميمات متعددة للمجففات المستخدمه فى تجفيف الاغذيه والمنتجات الزراعيه . وتختلف انواعها باختلاف المادة المراد تجفيفها وطبيعة ناتج التجفيف والعوامل الاقتصاديه التى يتوقف عليها تصريف المنتج . فتستخدم مجففات النفق Tunnel Driers فى تجفيف ثمار الفاكهه والخضر ، ومجففات الرذاذ Spray Driers فى تجفيف اللبن والبيض وعصير بعض الفواكه والخضروات مثل عصير الطماطم . وتضاف الحرارة داخل المجففات اما باستخدام التسخين المباشر Direct Heating او التسخين الغير مباشر Indirect Heating. ففى طريقة التسخين المباشر تستخدم الغازات الناتجه عن احتراق الوقود مباشرة فى تجفيف الاعلاف كما هى الحالة فى المجففات الدواره Rotary Driers وتستخدم طريقة التسخين الغير مباشرة فى غالبية مجففات اغذية الانسان حيث يمر الهواء المستخدم فى التجفيف على الاسطح الخارجية لافران يحترق داخلها الوقود او بملامسة الاسطح الخارجيه لمواسير البخار او امرار هواء التجفيف على مسخنات كهربائيه وتتوقف الطريقة المستخدمه فى التسخين على العوامل الاقتصاديه وجودة المنتج .

ونذكر فيما ياتى بعض انواع المجففات الشائعة الاستعمال :-

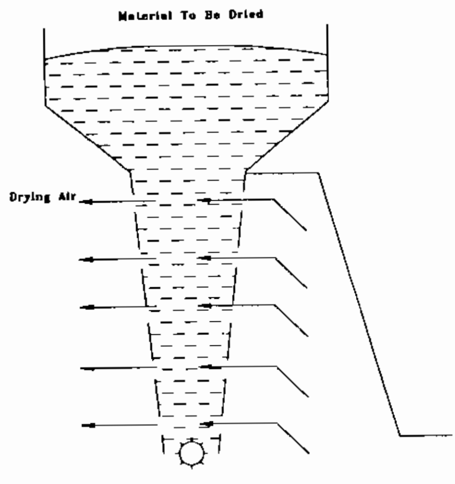
١- مجففات الحبوب والغلال على دفعات Batch or Bin Grain Driers



شكل (١١-٢) نظم المجففات على دفعات

وتستخدم لتجفيف الحبوب والغلال التى تحتوى على نسبة بسيطة من الرطوبة . وعادة يكفى استعمال الهواء العادى بدون تسخين فى فترة الصيف او اضافة كمية قليله من الحرارة للهواء فى موسم الشتاء . وتتكون من خزان كبير او قادوس Bin على شكل اسطوانة او يأخذ مقطعه شكل مستطيل ، يوجد به فاصل او قاطوع به ثقوب لاتسمح بمرور الغلال خلاله . ويدفع الهواء داخل القادوس خلال الغلال بواسطة مروحة دفع Air Blower ويمكن توجيه الهواء عند مروره داخل المجففات بحيث يتم توزيعه بانتظام حتي تتم عملية التجفيف بكفاءة عاليه كما هو مبين فى الشكل (١١-٣) :-

٢- التجفيف المستمر للحبوب والغلال
Continuous Gravity Flow Driers:

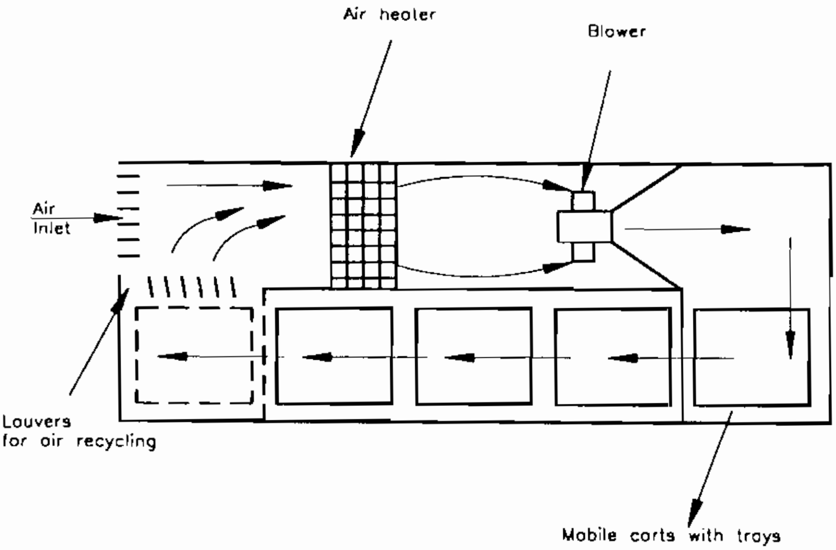


شكل (١١-٤) نظام التجفيف المستمر للحبوب

ويستخدم لتجفيف المواد المحببه التى يسهل تحركها بالجاذبيه الارضيه . ويستعمل الهواء الجوى فى التجفيف سواء كان ساخنا أو طبيعيا حسب موسم الحصاد . ويتكون المجفف من قادوس اسطوانى على ارتفاع عالى يتصل باسفله ماسورة ذات قطر مناسب ومثقبه من جوانبها لتسهيل امرار هواء التجفيف ، وتنتهى الماسورة بقرص به ريش مستقيمه لتنظيم عملية تفريغ الحبوب بعد تجفيفها. وعادة ماتستخدم سيور ناقله او روافع السواقى لتغذية القادوس بالحبوب من اماكن تخزينها والشكل (١١-٤) يبين كروكي للفكره الرئيسيه المستخدمه فى التجفيف المستمر .

٣- المجففات ذات المقصورات

Cabinet and Tray Driers:

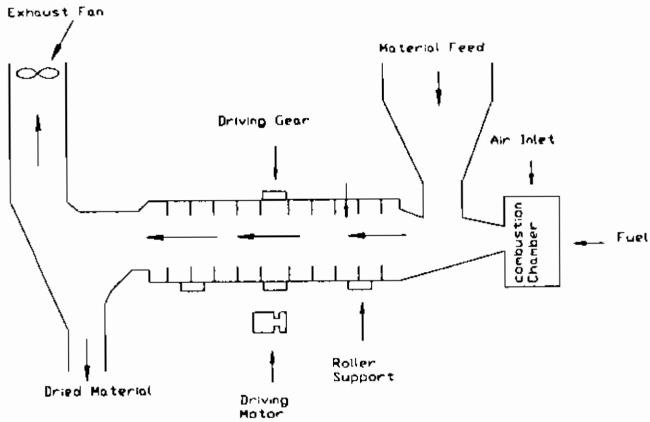


شكل (١١-٥) قطاع فى مجفف المقصورة

وتستخدم هذه المجففات عادة فى تجفيف المواد الغذائيه الصلبه مثل الفواكه والخضروات واللحوم . وهى عبارة عن حجرة مقسمة من الداخل بواسطة فواصل الى كبائن يوضع بداخلها عدد من صوانى المجفف مصفوفه فوق بعضها ومحموله على عربات ، وقد تكون الصوانى ثابته داخل المقصورات او الكبائن كرفوف متحركه او غير متحركه معتمده على نوع المادة المراد تجفيفها وهل يلزم تقليبها بين فترة واخرى او لاتتطلب التقليب كما هو مبين فى شكل (١١-٥) . وتقوم مراوح الهواء بسحبه لامراره على اسطح المسخن وتوجيهه بواسطة مواسير او مجارى فرعيه ليتخلل المادة المراد تجفيفها داخل كل مقصوره . ويكون مرور الهواء اما خلال الصوانى او رأسيا عليها، ولو انه يفضل مروره خلال الصوانى حتى لاتتعرض المادة الموضوعه علي الصواني القريبه من دخول الهواء الى سرعة جفافها عن المواضع البعيده عنها . ويمر الهواء بعد عملية التجفيف الى خارج المجفف عن طريق ماسوره على شكل مدخنه مزوده بفتحات يمكن التحكم فى اغلاقها او فتحها يدويا وبذلك يمكن الاستفاده من جزء من الحراره الخارجه مع الهواء فى تسخين الهواء الداخل الى المسخن حتي يمكن الاقلال من تكاليف التسخين . ويفضل استخدام مواسير البخار فى مسخنات هواء التجفيف الا انه فى بعض المناطق التى لايتوفر فيها توليد البخار(مثل الواحات والمناطق الصحراويه) تستخدم افران

لاحراق وقود مثل السولار او المازوت لتزويد مسخنات الهواء بالحراره اللازمه لعملية التجفيف. ويجب فى هذه الحالة مراعاة ان تكون مداخن الافران مرتفعه عن مداخل ومخارج الهواء بمسافة كافيه حتى لاتختلط نواتج الاحتراق مع هواء التجفيف متسببه فى تغير لون ورائحة المادة المجففه كما هى الحالة فى مجففات البلح فى الواحات . وتعتبر طريقة التجفيف بالمقصورات طريقة متقطعه Intermittent على دفعات وبذلك يكون انتاجها محدود . وتتميز بكبر مساحة جدران المجفف بالنسبه لسعته العمليه ، ويؤخذ عليها ارتفاع تكاليف نظام الدورة الهوائيه وما تتطلبه من منظمات آليه .

٤- المجففات الدواره : Rotary Driers



شكل (١١-٦) قطاع فى مجفف دوار

وتستخدم هذه المجففات للمواد التى لايسهل حركتها بالجاذبيه الارضيه والتى بها نسبة رطوبه عاليه كالكسب ومخلفات العلف وتستعمل كذلك فى تجفيف الحشائش وعلى ذلك فهى تصلح لتجفيف البرسيم ، وعامة تستخدم هذه المجففات لتجفيف اعلاف للحيوانات والدواجن .

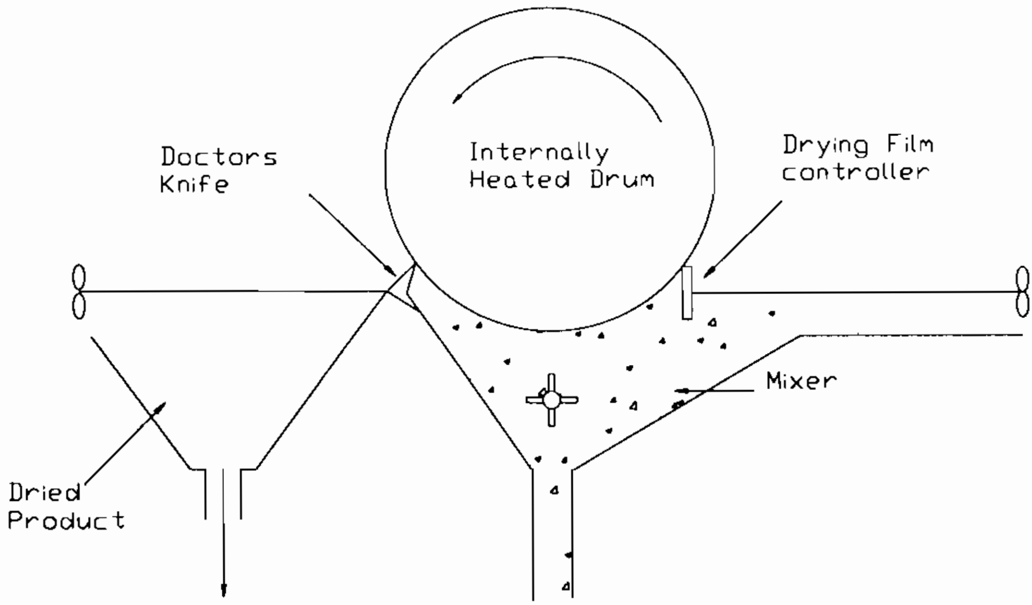
وتتكون هذه المجففات من اسطوانة بها ريش تقليب مثبته علي طول محيطها الداخلي . وتدور الاسطوانه حول محورها الطولي افقيا بواسطة ترس مثبت حول محيطها الخارجى وعند منتصفها ومتصل بترس آخر على عمود ادارة موتور كهربائى. وتتحمل الاسطوانة على بكرتين او اكثر من الحديد الزهر عند طرفيها . ويتم تغذية المجفف بالمادة المراد تجفيفها بواسطة قمع تلقيم مخروطى الشكل عند احد طرفيها (الطرف الرطب) ، ويتم نقل المادة داخلها مع تقليبها بصفه مستمره نتيجة للريش الداخليه . وكذلك يمكن التحكم فى سعتها بواسطة تعديل زاوية ميل محورها الطولى على المستوى الافقى كما هو مبين فى شكل (١١-٦) . وهناك طرق اخـــرى

لادارة اسطوانة المجفف مثل طريقة استخدام بكرات احتكاك وفى هذه الطريقة تثبت كمرات مجرى عند طرفى الاسطوانه حول محيطها الخارجى ، وتدار البكرات بواسطة موتور كهربائى ويتم نقل الحركة الدائريه للاسطوانه عن طريق احتكاك البكرات على اسطح كمرات المجرى.

وعادة ماتستخدم نواتج الاحتراق مباشرة فى تسخين الهواء اللازم لتجفيف الاعلاف مما يؤدى الى خفض التكاليف اللازمه للوقود وفى كثير من البلاد مثل كندا وأوربا تصنع هذه المجففات بحيث يمكن نقلها على مقطورات من مكان الى آخر حتى تتم عملية تجفيف الاعلاف فى نفس المنطقة الموجودة فيها ، وبذلك يمكن الاقلال من مصاريف النقل التى تمثل جزءا كبيرا من تكاليف انتاج الاعلاف المجففه ، اذ ان مواد العلف الخضراء تحتوى على نسبة عاليه من الرطوبه تصل احيانا الى ٩٠ - ٩٢٪ وبذلك يمكن انتاج اعلاف مجففه رخيصه .

٥- المجففات ذات الاسطوانات : Drum Driers

هذه المجففات شائعة الاستعمال فى تجفيف المواد الغذائيه السائله والشبه سائله مثل اللبن الكامل او الفرز ، عصير بعض انواع الفواكه والخضروات مثل الطماطم التى كثر استعمالها بمعدل كبير خصوصا فى الولايات المتحده الامريكيه ، كما انها تستخدم فى تجفيف انواع الحساء (الشوربه) المختلفه وتحويلها على شكل مساحيق .



شكل (١١-٧) قطاع فى المجفف الاسطوانى

وتتكون هذه المجففات من اسطوانه معدنيه واحدة او اثنين ، يختلف معدنها باختلاف المادة الغذائيه المراد تجفيفها . وعادة ما تصنع من الحديد الزهر او من الصلب الغير قابل للصدأ خاصة عند تجفيف عصير الخضر والفواكه حتى لاتتفاعل مع الاحماض الموجودة بهذه المواد . وتتم عملية التجفيف بان تتساقط الماده المراد تجفيفها على السطح الخارجى للاسطوانات بحيث يتكون غشاء او طبقة رقيقه جدا من المادة المراد تجفيفها والتى تستمد الحرارة اللازمه لعملية التجفيف من سطح الاسطوانات التى يمر داخلها بخار . ويمكن كذلك تكوين طبقة السائل الرقيقه بان توضع المادة الغذائيه السائله فى حوض او اناء اسفل الاسطوانات بحيث يمس سطح الاسطوانات الخارجي السائل عند دورانها ، ويتم تجفيفها علي سطح الاسطوانات وتستخدم سكينه او حافة حادة على الاسطح لفصل الطبقه المجففه وتجميعها فى حوض المنتج كما هو مبين فى شكل (١١-٧). وهناك بعض التصميمات يمكن فيها احداث تفريغ داخل الاسطوانه ، وهى احدث النظم المستخدمه فى انتاج المواد الغذائيه المجففه حيث تحتفظ بمعظم صفات المادة الطازجه . وتتوقف مدة التجفيف ومعدله على سرعة دوران الاسطوانات وضغط البخار داخلها وكذلك على سمك طبقة المادة المجففه على السطح الخارجى للاسطوانات .

ويتميز هذا النوع من المجففات بان تكاليف انتاج المواد المجففه تكون قليلة اذ انه فى المتوسط تحتاج مثل هذه المجففات الى ٢ -٣ كيلوجرام بخار لكل كيلوجرام رطوبه متبخره من المادة الغذائيه . ونظرا لان مساحة سطح انتقال الحراره يكون كبير (مساحة السطح الفعال تكون حوالي ثلاثة ارباع سطح الاسطوانه الواحده) فان معدل التبخير يرتفع ويتراوح بين ٢ - ٤ كجم رطوبة متبخره لكل مترمربع من سطح التبادل الحرارى فى الساعه .

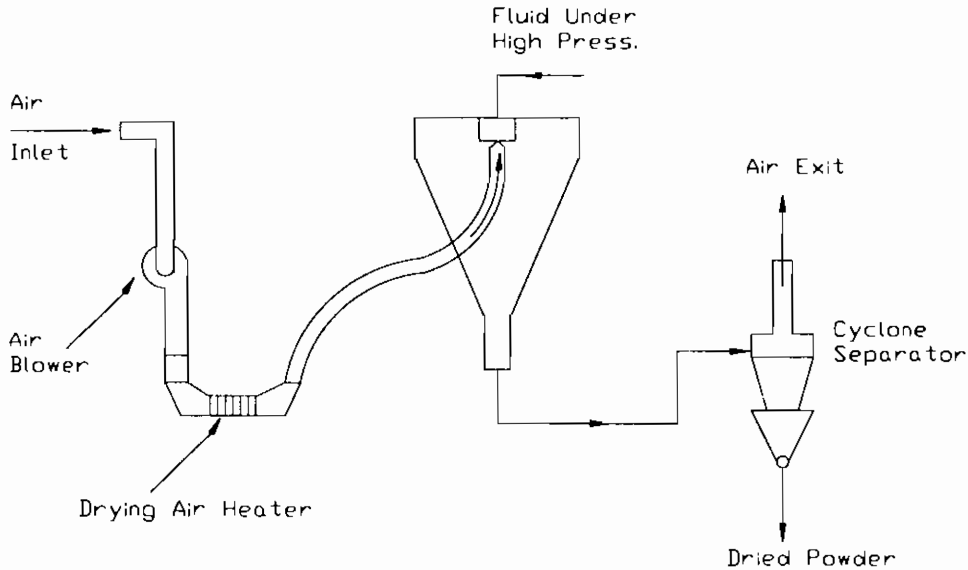
٦- مجففات الرذاذ : Spray Driers

تستخدم هذه المجففات فى تجفيف المواد الغذائيه السائله والمحاليل والمستحلبات مثل البيض واللبن وعصير الفواكه والخضروات وتحويلها الى مساحيق. وتتم عملية التجفيف بتذرية السائل على هيئة ذرات دقيقه فى صورة ضباب معلق فى الهواء الساخن وبذلك يتم تبخير الرطوبه بسرعة فائقه يترتب عليها ترسيب المادة الجافه فى القاع على صورة مسحوق حيث يتم سحبها بواسطة مراوح خاصه الى سيكلونات الترسيب . ويتم تفتيت السائل الى جزئيات باحدى طريقتين:

أ- استخدام طلمبات ذات ضغط مرتفع لدفع السائل داخل ثقوب ضيقه (٢٠٠٠ -٤٠٠٠ رطل/بوصه^2 أو ١٤٠ - ٢٨٠ كجم/سم^2).

ب- استخدام هواء مضغوط فى ادارة اقراص بسرعه عاليه يتسبب عنها دفع السائل بالقوه الطاردة المركزيه لاحداث التفتيت المطلوب .

أما السيكلونات فهى عبارة عن اوعيه مخروطية الشكل بها اسطح داخليه ملساء يمكن بواسطتها تقليل سرعة الهواء المحمل بالمسحوق الجاف ، فتسمح بترسيب المسحوق على الاسطح الداخليه للسيكلونات وبذلك يسهل عملية فصلها .



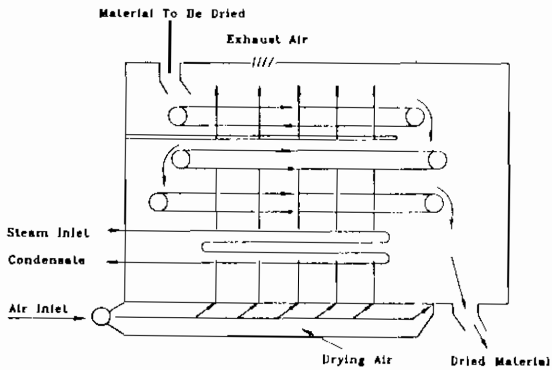
شكل (١١-٨) رسم تخطيطي لوحدة تجفيف بالرذاذ

ويتكون مجفف الرذاذ من حجرة رئيسيه من المعدن (غالبا من الصلب الغير قابل للصدأ) على شكل مخروطي اسطواني كما هو مبين فى شكل (١١-٨) . وتستخدم مروحة فى دفع الهواء داخل هذه الحجرة بعد اتمام تسخينه أما بواسطة مسخن بخار او كهرباء او غاز البوتاجاز ، حيث يتم اختلاطه بذرات السائل وتستغرق مدة التجفيف حوالى ٣٠ ثانيه للحصول على مسحوق السائل المتجمع علي اسطح الحجرة الداخليه . ويعاب على هذا النوع من الجففات انخفاض الكفاءة الحراريه للتجفيف اذ يحتاج الكيلوجرام الواحد المتبخر من الرطوبه الى حوالى ٣٣٥٠ كيلوكالورى فى حين لايحتاج الى اكثر من ١٤٠٠ كيلوكالورى فى حالة استخدام مجففات النفق . الا ان هذا النوع من الجففات يتميز بسرعة التجفيف التى رغم ارتفاع درجة حرارة هواء التجفيف فيها (حوالى ١٢٠°م) فتنخفض درجة حرارة المادة وهى فى حالة رذاذ الى درجة منخفضه جدا وذلك نتيجة لسرعة عملية التبخير (قد تصل درجة حرارة ذرات المادة الى حوالى ٤٠°م).

٧- مجففات النفق Tunnel Driers

وهذه المجففات تعمل بطريقة النظام المستمر Continuous Driers وتمتاز بكبر سعتها وامكانية التحكم فى العوامل التشغيليه المختلفه اللازمه للتجفيف . وحتى يمكن استخدامها بدون انقطاع فانه يلزمها مدة تسخين ابتدائيه Come-Up time حتى يمكن الوصول الى الظروف الهوائيه المستقره لعملية التجفيف . وتتراوح هذه المدة من ٦ - ٨ ساعات على الاقل . وتستعمل هذه المجففات فى تجفيف الفاكهه والخضر واحيانا اللحوم والاسماك .

ومجففات النفق تتكون من حجرات طويله مقطعها مستطيل اذ يبلغ ارتفاعها حوالى ٥ر١ - ٣ متر وطولها حوالى ١٠ - ١٢ متر وتوضع المادة المراد تجفيفها على صوانى التجفيف التى تحملها عربات يمكن قطرها بواسطة جنازير او احبال بسرعة مناسبه داخل النفق ، تتراوح عدد صوانى كل عربه من ٢٠ الى ٣٠ صنيه مرتبه بحيث تكون هناك مسافه كافيه بين كل صينيه واخرى تسمح بمرور هواء التسخين خلال المادة الرطبه. وتدخل العربات المحمله بصوانى التجفيف من احد طرفي المجفف ويسمى بالطرف الرطب Wet side وتخرج من الطرف الآخر ويسمي بالطرف الجاف



Moving Belt Conveyors Drier

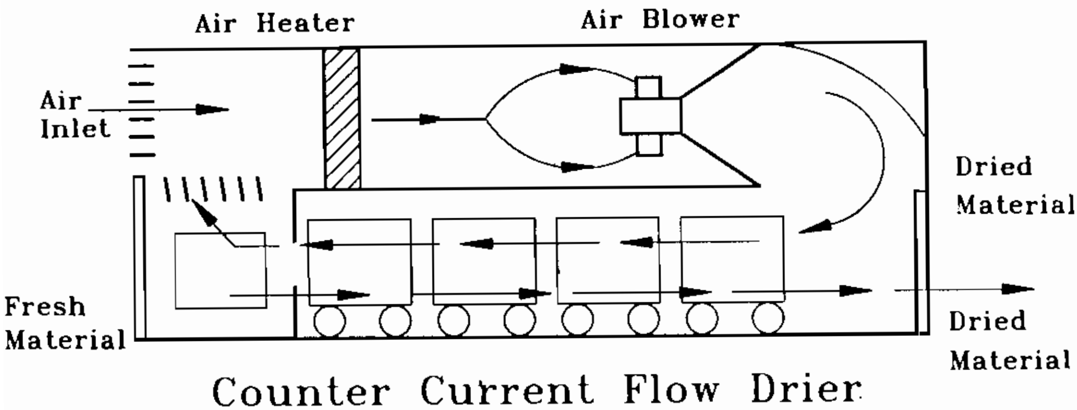
شكل (١١-٩) مجفف ذو سيور

Dry side . وفى بعض التصميمات شكل رقم (١١-٩) تتكون المجففات من حصيره متحركة او سيور لانهائيه تتحرك داخل نفق التجفيف ، وتصنع من الشبك المعدنى او من سدابات خشبيه رقيقه تتباعد عن بعضها بمسافات صغيره بحيث لاتسمح للمادة المراد تجفيفها بالسقوط من خلال هذه الفتحات . والمجففات ذات السيور الناقله مرتفعه فى تكاليف الانشاء وقليله فى معدل انتاجها ، وهى غير منتشره الاستعمال ولاتصلح في تجفيف ثمار الفاكهه لتعرضها للتهشم عند سقوطها من سير الى آخر . وتوضع مواسير البخار (سربنتينات) عادة بين كل سير وآخر . ويدفع

هواء التجفيف من اسفل الى اعلى فيمر على اسطح المواسير الساخنه ثم خلال السيور المحمله بالمادة المراد تجفيفها . ويفضل عليها مجففات النفق ذات العربات والصواني اذ يمكن التحكم فى معدلات التجفيف بتغيير اتجاه مرور هواء التجفيف التى تتحدد سرعته على اسطح المادة المراد تجفيفها بالتحكم فى المسافات بين الصوانى وبعضها حتى لايحدث جفاف سطحى خصوصا لثمار الفاكهه عند ما تزيد سرعة التجفيف عن الحد المناسب .

ويمر هواء التجفيف الساخن على اسطح الصوانى المحمله بالمادة الرطبه باحدى الطرق الآتيه :

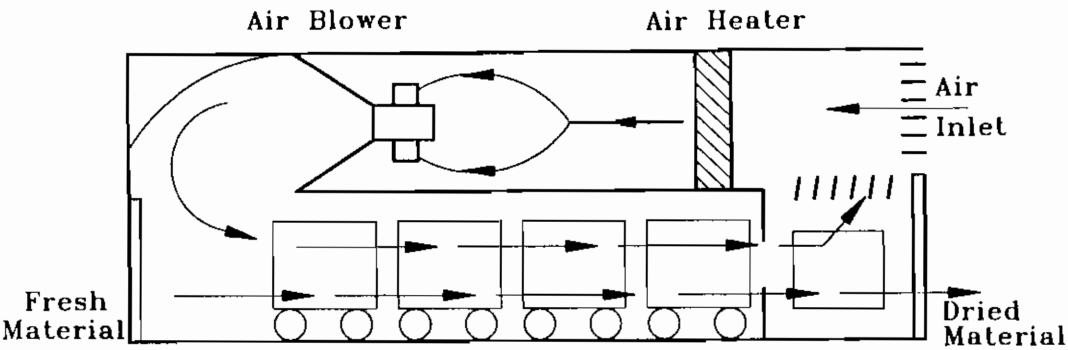
أ- النظام العكسى : **Counter-current flow**



شكل (١١-١٠) مجفف نفق متعاكس

وفيه يمر هواء التجفيف فى اتجاه مضاد لاتجاه حركة العربات فيدفع الهواء بعد تسخينه بواسطة مروحة دفع Air Blower من الطرف الجاف لنفق التجفيف الى الطرف الرطب وبذلك يلامس الهواء الاكثر سخونه والاكثر جفافا المادة الغذائيه التى قاربت على انتهاء تجفيفها وعلى ذلك نجد انه يمكنها تحمل درجات الحـــــراره المرتفعه نسبيا دون حدوث حالة الجفاف السطحى لها كما هو مبين في الشكل (١١-١٠). ويفضل استخدام هذا النظام فى تجفيف ثمار الفاكهه خاصة العنب وعلى عكس الخضر فيجب تجفيف ثمار الفاكهه ببطء حتى لاتتعرض لحالة الجفاف السطحى.

ب- النظام المتوازى : Parallel flow

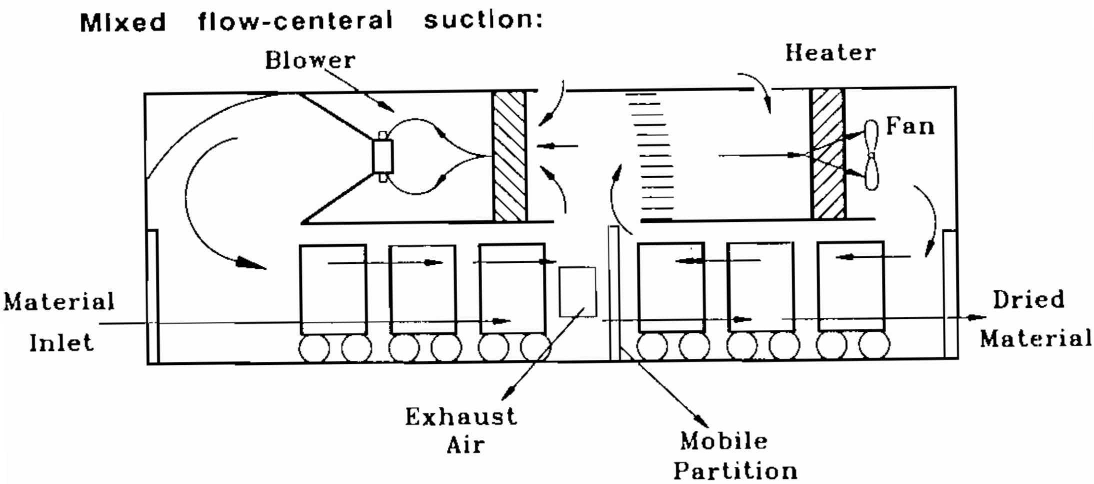


Parallel Flow Drier

شكل (١١-١١) مجفف نفق متوازي

وفى هذا النظام يتحرك الهواء فى اتجاه موازى لتحرك العربات المحمله بالمواد المراد تجفيفها ، فيدخل الهواء بعد تسخينه مع المادة الرطبه من الطرف الرطب لنفق التجفيف كما هو مبين في الشكل (١١-١١) وحيث ان الهواء الساخن يقابل المادة ذات الرطوبه المرتفعه فانه يمكن استعمال درجات حرارة عاليه في التجفيف عن النظام العكسي بدون تعريض المواد المجففه الى التلف نتيجة للتلف السطحى لها . ولايفضل استخدام هذه الطريقه فى التجفيف في المواد التى تجف ببطء مثل القراصيا الا اذا كانت حمولة الصوانى ضعيفه جدا . وتستعمل بنجاح تام فى الخطوات الاولى من التجفيف خاصه فى حالة تجفيف الخضر المجزءه الى قطع سميكه نوعا حيث يقابل الهواء الجاف الساخن فى بداية عملية التجفيف فيفقد السطح المعرض للهواء رطوبته بسهوله وسرعه .

ج- النظام الثنائى ذو المداخل الوسيطه



Dual Drier With Intermediate Ports

شكل (١١-١٢) مجفف نفق مركب

اذ يستخدم فيها الطريقتين السابقتين معا ، فيتم تجفيف المادة الغذائيه على مرحلتين . المرحله الابتدائيه ويمر فيها هواء التجفيف المسخن ذو درجة الحرارة المرتفعه فى اتجاه موازى لمرور العربات ، والمرحله الثانيه يمر فيها الهواء فى اتجاه عكسى لمرور العربات . وتستخدم فى هذا النظام حواجز او فواصل مرنه من المطاط او الخشب او القماش السميك لتنظيم حركة الهواء داخل النفق . ويدخل هواء التجفيف من فتحة وسطى فى نفق التجفيف ويمر فى اتجاه طرفى النفق ، موازيه عند الطرف الرطب وعكسيه عند الطرف الجاف للنفق كما هو مبين فى شكل (١١-١٢).

ويتم فى المرحله الاولى تبخير حوالى ٩٠٪ من رطوبة المادة بسبب استخدام درجات حرارة عاليه . ويجب استخدام درجات حرارة منخفضه فى هواء تجفيف المرحله الثانيه حتى لايعرضها للاحتراق او التشقق السطحى وعلى ذلك يزود نفق التجفيف بسخا نين احدهما يعطى كمية حرارة محدودة عند الطرف الجاف والآخر يولد كمية عاليه من الحرارة عند الطرف الرطب . ومن المعروف ان سرعة التبخير فى المرحله الثانيه تكون بطيئه وبذلك تنخفض نسبة الرطوبه فى الهواء الخارج من تجفيف هذه المرحله مما يساعد على استخدام هذا الهواء بخلطه بهواء تجفيف المرحله الاولى حتى يمكن الاستفاده من الحراره الموجودة فيه والاقلال من تكاليف عملية التسخين .

الباب الثانى عشر

التبريد والتجميد COOLING AND FREEZING

نظريات التبريد

الحفظ باستخدام درجات الحرارة المنخفضة :

ويقصد بذلك حفظ المواد الغذائيه سواء الخام او بعد تجهيزها ، فى وسط ذو درجة حرارة منخفضة وبحيث تصل درجة حرارة المادة المراد حفظها الى درجة حرارة الوسط المحيط بها ، مع استمرار درجات حرارة كل من الوسط والمادة المحفوظه على الدرجة المراد تخزينها عليها، اى الدرجة المناسبه . هذا وقد استخدمت هذه الطريقه من طرق الحفظ فى حفظ الكثير من الاغذيه لبيعها فى كثير من المناطق القطبيه ، الا انه فى المناطق الاخرى التى لاتتوفر فيها هذه الظروف فتستخدم عمليات تبريد صناعية . ويمكن تعريف التبريد بانه عملية امتصاص الحرارة من جسم فى درجة حرارة اقل من درجة حرارة الجو المحيط به ، او هو عملية نقل الحرارة من جسم ذو درجة حرارة منخفضة الى جسم ذو درجة حرارة مرتفعه .

ونتيجة للتفاوت فى درجات الحرارة التى يمكن الوصول اليها واستخدامها فى حفظ الاغذيه فانه يختلف التاثير الحافظ لهذه الدرجات على الاغذيه المختلفه تبعا لعوامل فسادها . فاذا استخدمت درجات حرارة تبلغ حدا من الانخفاض يكفى لتجميد المادة الغذائيه ولن يتم ذلك الا باستخدام درجات حرارة اكثر انخفاضا من درجات تجميد هذه المواد ويطلق على هذه الطريقة اسم الحفظ بالتجميد Freezing Preservation وعادة تتراوح درجات حرارة تجميد الاغذية بين - ٢°م الى -٢٨°م.

الوسائل المستخدمه فى خفض درجات الحراره :

تختلف الوسائل التى تصلح لخفض درجات حرارة كل من وسط التبريد والمادة المراد حفظها عن طريق استخدام درجات الحرارة المنخفضه باختلاف ظروف عملية التبريد ذاتها والمادة المراد حفظها ودرجات الحراره المنخفضة المطلوب الوصول اليها وكذلك باختلاف امكانيات العمليه ذاتها . ويقسم التبريد الى نوعين اساسيين هما :

أولا : التبريد الطبيعي :

أ- استخدام الثلج العادي :

يستخدم الثلج كوسيط تبريد فعال عند درجات حرارة انصهاره تحت الظروف الآتيه :

١- عندما يراد احداث التبريد على فترات قصيره .
٢- بعد المكان المراد عمل التبريد به عن اماكن توليد الطاقه الكهربائيه.
٣- رخص سعر الثلج .

ودرجة حرارة انصهاره حوالى الصفر المئوى ، فاذا وجد فى جو حار فينصهر بامتصاص كمية من حرارة الجو وبالتالى يتم تبريده . الا انه غالبا لايمكن ، عن طريق استخدام الثلج وحده مهما زادت الكميه المستخدمه بالنسبه للحيز المراد تبريده ، الوصول بدرجات الحراره الى درجات اقل من صفر الى -٤°م . لذلك فانه لايوفى باغراض التبريد لمدة طويله نسبيا او لحيازات كبيرة نوعا بطريقة يمكن استخدامها فى التبريد تجاريا ، هذا الى جانب الحاجه الى استمرار استخدام كميات من الثلج بصفه مستمره مع ضرورة التخلص من الماء الناتج عن الانصهار كذلك فان وصول جزء من الماء المنصهر الى المادة المراد تبريدها يؤدي الي رفع نسبة الرطوبه بها الي جانب اعتبار الثلج نفسه أحد مصادر التلوث لبعض الاغذيه ، لذلك فان هذه الوسيله لاتفى بأغراض التبريد التجارى الا انها لازالت تستخدم فى بعض الحالات المحدودة فى تبريد الفاكهه والخضروات لامتصاص حرارة الحقل وكذلك فى تبريد اللحوم والاسماك للتخلص من الحراره المنبعثه منها .

ملحوظة :

وتقدر الحراره الكامنه اللازمه لانصهار رطل واحد من الثلج العادى ١٤٤ وحدة حراريه بريطانيه ، وتلك اللازمه لكيلوجرام واحد من الثلج العادى ٧٩.٩ كيلو كالورى.

ب- استخدام المخاليط المبرده :

والتى اهمها مخلوط الثلج والملح خاصة عند وجود كل من الثلج والملح فى حالة مجروشه . وتعتمد درجة حرارة المخلوط على النسبه المئويه للملح فى المخلوط ، حيث انه من المعروف طبيعيا انه كلما زادت نسبة الملح بالنسبه للثلج كلما امكن الوصول الى درجات حرارة اكثر انخفاضا . وتفسير هذه الظاهرة على اساس الخواص

الطبيعيه لبلورات الثلج مما يجعل الماء المنصهر المتخلف فى حالة مرتبطة وبذلك يلزم وجود طبقة اخرى من الماء لتغليف بلورات الثلج وهذا لن يحدث الا نتيجة لانصهار كمية اخرى من الثلج الذى لايتم الا بامتصاص كمية مناسبه من الحراره سواء من الثلج المجاور او من الوسط المحيط بصفه عامه مما يؤدى فى النهايه الى امكان الوصول الى درجات الحرارة المنخفضه ويساعد ذلك كما سبق زيادة سطح الثلج المعرض اى وجوده فى صوره مجروشه .

والجدول الآتى جدول (١٢-١) يبين العلاقه بين النسبه المئويه للملح فى المخلوط ودرجة حرارة المخلوط :

جدول (١٢-١) درجة حرارة تجمد مخاليط الثلج والملح

النسبه المئويه للملح فى المخلوط (نسبه وزنيه)	درجة حرارة المخلوط °م	درجة حرارة المخلوط °ف
صفر	صفر	٣٢
٥	-٨ر٢	٢٧
١٠	-٨ر٦	٢٠
١٥	-٧ر١١	١١
٢٠	-٨ر١٦	٥ر١
٢٥	-٣ر٢٣	-١٠

الثلج الجاف (ثانى اكسيد الكربون) : Dry Ice

ويحدث التبريد بامتصاص الثلج الجاف للحرارة من المواد المراد تبريدها ويتحول الثلج الجاف من حالته الصلبه الى حالة غازيه مباشره وبدون تحوله الى سائل فلا يترك آثار من الماء كما يحدث عند استعمال الثلج . وقدرت الحرارة الكامنه اللازمه لتحويل رطل واحد من الثلج الجاف الى غاز (بين درجة حرارة - ١٠٦ الى - ١٢٢ °ف) فوجد انها تساوى ٣ر٢٤٦ وحدة بريطانيه . والحراره الكامنه اللازمه لتحويل كيلوجرام واحد (بين درجة حرارة - ٧٧ الى - ٨٦ °م) ، تساوى ٧ر١٣٦ كالورى .

ويستخدم الثلج الجاف بصفه خاصه فى نقل الخضر والفاكهه بالسيارات او بعربات السكك الحديديه اذ ان وزنه خفيف ولايترك اثرا للماء ولا يتفاعل مع جدران السيارات كما انه عديم الرائحه وغير قابل للاشتعال .

ثانيا : <u>التبريد الصناعى</u> :

ويعتمد على استغلال الحراره الكامنه للسوائل المتطايره التى تمتص عند تبخيرها جزءا من حرارة الهواء المحيط بها ويختلف مقدار هذا الجزء باختلاف كمية الحرارة الكامنه لهذه السوائل . ولكى تكون عملية التبريد اقتصادية فانه يلزم تحويل السوائل بعد تطايرها الي الحاله السائله حتى يمكن استخدامها مره اخرى . وهذا معناه انه يجب سحب الحراره الكامنه لتكثيفها الى سائل مره اخرى وذلك يستلزم ملامستها لجسم درجة حرارته اقل من درجة حرارة تبخر هذه السوائل . ويمكن الوصول الى هذا الغرض باستخدام خواص السوائل الثرموديناميكيه فنجد انه عند ارتفاع الضغط الواقع على السائل ترتفع درجة حرارة تكثيفه عن درجة حرارة الجو المحيط به وينتج عن ذلك التخلص من الحرارة الكامنه به وتكثفه الى سائل تحت ضغط مرتفع .

ويمكن تلخيص نظرية التبريد الصناعى بالقوانين الآتيه :

١- تمتص السوائل عند تبخرها الحراره الكامنه اللازمه للتبخر من حرارة الهواء المحيط بها ، وبذلك يمكننا خفض درجة حرارة غرفة محدودة الحجم معزوله عن الخارج بان نمرر داخلها سائل يمتص حرارته الكامنه من الغرفه لكى يتحول الى غاز .

٢- تعتمد درجة حرارة تبخر السائل على الضغط الواقع عليه فترتفع درجة حرارة التبخر بارتفاع الضغط وتنخفض بانخفاضه وبذلك يمكننا ان نتحكم فى درجة حرارة الغرفه بان ننظم مقدار الضغط الواقع على سائل التبريد الذى يمر داخل الغرفه .

٣- تتحول الغازات الى سوائل عند تغيير الضغط الواقع عليها عند درجات حرارة معينه ، وبذلك يمكننا تحويل الغازات الناتجة عن تبخر سوائل التبريد داخل الغرفه الى سوائل مره اخرى وذلك بتغيير الضغط الواقع عليها والاستفاده منها مره اخرى بامرارها داخل الغرفه وهكذا . وتتم هذه العمليه بواسطة ضغط الغازات الناتجة عن تبخر السائل بواسطة مكابس خاصه وبذلك ترتفع درجة حرارة تكثيفها عن الجو المحيط بها فيسهل التخلص من حرارتها الكامنه وتحويلها الى الحالة السائله .

أنواع السوائل المبرده : Refrigerants

هى السوائل التى تتبخر عند تقليل الضغط الواقع عليها وهى متعددة الانواع ويشترط فيها :

١- انخفاض درجة حرارة التبخر والتكثيف .
٢- يلزم لتبخرها او تكثيفها كمية كبيرة من الحراره الكامنه .
٣- سهولة ضغط ابخرتها لتحويلها الى الحالة السائله .
٤- ذات حجم نوعى صغير (كثافتها عاليه) .
٥- عديمة التأثير على المعادن الملامسه لها .
٦- خلوها من الرائحة النافذه وعدم قابليتها للالتهاب او الانفجار .
٧- سهولة اكتشاف مواضع تسربها .
٨- اقتصاديه فى الثمن .
٩- غير سامه .
١٠- لاتتأثر بالرطوبه .

والسوائل الشائعه الاستعمال فى التبريد الصناعى تشمل مايأتى :-
١- الفريون بجميع مركباته (فريون ١١ - ١٢ - ٢١ - ٢٢ - ١١٣ - ١١٤).
٢- ثانى اكسيد الكبريت .
٣- ثانى اكسيد الكربون .
٤- النشادر .
٥- كلوريــد الميثيل .
٦- البيوتان .

وقد لاحظ علماء الفيزياء والبيئه على مدى نصف القرن الماضى أن هناك تغير ملحوظ فى درجات الحراره وكمية الاشعاعات على سطح الكره الأرضيه. وحيث أنه من المعروف علميا بأن هناك طبقه كثيفه تسمى طبقة "الأوزون" تمثل غطاءً كيماويا فى الأجواء العليا . وهذه الطبقه تساهم فى حماية كوكب الأرض عن طريق تحديد حجم الأشعه فوق البنفسجيه التى تصل إليه من أشعة الشمس وأن أى زيادة فى هذه الأشعه تتسبب فى تهديد حياة الانسان والحيوان والنبات نتيجة للتغير الجذرى فى الطقس على سطح الأرض مع سقوط الأشعه الضارة من الشمس.

ومن خلال الدراسات التى أجريت على هذه الظاهره تبين أن هناك تفاعلات نتجت عن استخدام الأيروسولات عامة وغازات الفريون بأنواعها فى إحداث ثقب فى طبقة الأوزون .

وقد قامت الوكالة الدوليه للأرصاد الجْويه بمراقبة إتساع ثقب الأوزون على مدى الأربعين عاما الماضيه والتى قد بلغت مساحته الآن حوالى عشرة ملايين كيلومتر مربع وهى توازى مساحة القارة الأوروبيه تقريبا . وأكدت الوكالة أن مساحة الثقب الذى اخترق طبقة الأوزون فوق المنطقه القطبيه الجنوبيه قد تضاعف خلال العام الماضى وأنه فى اتساع مستمر بمعدل ١٪ يوميا .

ونتيجة لذلك إتخذت المنظمه الدوليه للبيئه التابعه للأمم المتحدة عدة قرارات والتى من بينها إيقاف استخدام غازات الفريون تدريجيا بحيث يتم ذلك الإيقاف نهائيا بنهاية القرن الحالى.

وقد تم التوصل إلى بدائل لهذا الغاز حديثا بغاز تبريد سمى R134a (Refrigerent 134a) تركيبه الكيمائى Tetrafluoroethan 1, 1, 1,2 ورمزه CH_2FCF_3 وأعطى الأسم التجارى Reclin 134a وله نفس الخصائص الطبيعيه والكيمائيه لموائع التبريد الأخرى ويتميز عن موائع مركبات الفريون من حيث الغازات والأبخرة الناتجه عنه لايحدث عن تفاعلها مع طبقات الجو العليا إختراق لطبقة الأوزون الحاميه للأرض من الاشعاعات الضاره .وتوجد شركات متخصصه فى انتاج هذه الموائع وتأخذ رموز تعبر عن كل شركة مثل G, R .....

ويجب مرعاة النقاط الآتيه عند اختيار سائل معين لاستعماله بوحدات التبريد المختلفه :

١- <u>التفاعلات الكميائيه</u> :

ينعدم تاثير ثانى اكسيد الكبريت على الصلب والنحاس اذا كان جافا تماما ، اما اذا وجدت بعض الرطوبه فيتحول ثانى اكسيد الكبريت الى حامض الكبريتوز الذى يتسبب وجوده فى تآكل المواسير الصلب والنحاس والسبائك المشابهه ، غير ان وجود الرطوبه مع سائل النوشادر لايؤثر بتاتا على المعادن المختلفه .

٢- <u>وجود رطوبة بوحدات التبريد</u> :

يذوب الماء فى ثانى اكسيد الكبريت وثانى اكسيد الكربون والنشادر وبذلك عند مرور الغاز المحمل ببخار الماء بالمناطق التى تنخفض فيها درجات الحرارة ، لايتجمد الماء فلا يحدث انسداد فى مواسير او صمامات التحكم الخاصه بوحدة التبريد . ويحدث عكس ذلك بالنسبه للفريون بجميع مركباته اذ ان الماء لايذوب فى هذه المركبات ، ووجود الرطوبه يسبب انسداد المواسير حيث يتجمد ويهدد حدوث انفجار

بوحدة التبريد خصوصا فى المناطق التى يكون بها الضغط مرتفع ويوضع عادة فى مواسير سائل الفريون مرشح لامتصاص الرطوبه التى قد تكون عالقه به حتى لاتتعرض وحدة التبريد لاخطار حدوث انسداد فى المواسير .

ويعتبر سائل الفريون من اكثر السوائل استعمالا ، ويوجد عدة مركبات له يرمز لها بارقام مختلفه هى فى الواقع اسمائها التجاريه مثل فريون ١١ ، ١٢ ، ٢١ ، ٢٢ ، ١١٣ ، ١١٤ .... وتمتاز جميع سوائل الفريون بانها غير سامه وغير قابله للاشتعال او الانفجار الا انها تتسبب في اتساع ثقب الأوزون ويجري حالياً تعديلها واستبدالها بنوعيات اخري ليس لها هذا الاثر .

النظم الرئيسيه للتبريد الصناعى :

أولا : التبريد الصناعى بالضغط : Compression System

ويعتبر من الطرق الشائعه الاستعمال فى الاغراض المنزليه والتجاريه نظراً لكفاءتها العاليه وبساطة تصميمها ، وتتلخص دورة التبريد بالضغط فى الخطوات الآتيه :

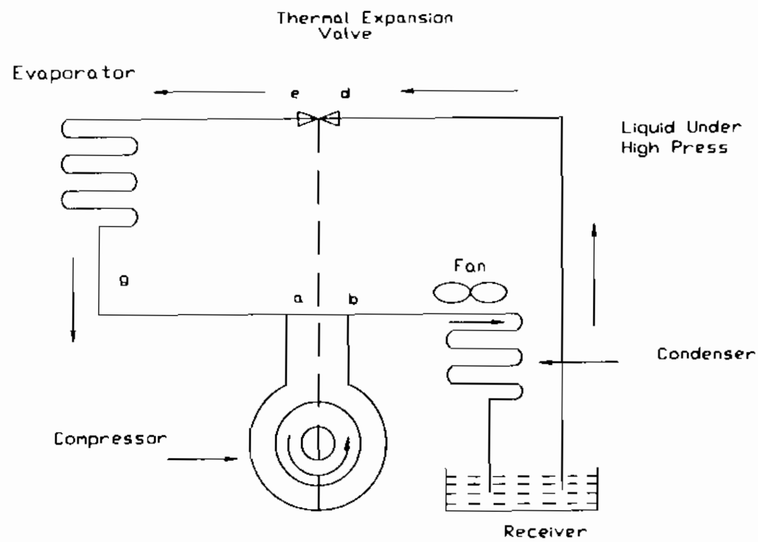
١- تبخر السائل المبرد تحت ضغط منخفض حيث يمر السائل فى انابيب المبخر Evaporator (الجزء الذى توجد حوله الماده المراد تبريدها) ويكون ضغط السائل منخفضا فتكون درجة حرارة تبخيره منخفضة ولكن يتحول من الحالة السائله الى الحاله الغازيه يمتص الحراره اللازمه لتبخيره من الجو المحيط به وبذلك تنخفض درجة حرارة الماده المراد تبريدها .

٢- ضغط الغاز الناتج لرفع درجة حرارة تكثيفه ويتم ذلك بواسطة ضاغط الغاز ، وتكون وظيفة الضاغط خفض ضغط الغاز فى المبخر من جهة ورفع ضغطه فى الجهه الاخرى من الضاغط وبذلك ترتفع درجة حرارة الغاز عند درجة حرارة المنطقه المحيطه به .

٣- تكثيف هذا الغاز على درجة حرارة مرتفعه حيث يمر الغاز داخل انابيب المكثف التى تكون محاطه بالماء او الهواء وينتج عن ذلك ان الغاز يفقد حرارته الكامنه ويتحول الى سائل تحت ضغط مرتفع ويجمع السائل الناتج فى مستودع او قابله Receiver ويكون الماء المستخدم فى التكثيف عادة على شكل رذاذ من رشاشات (دش) ويمكن اعادة تمريره بواسطة طلمبه صغيره . ويكون المكثف فى الوحدات الكبيره على شكل مبادل حرارى يحيط بمواسير السائل المبرد ويحدث تجديـــد

بصفه مستمره وسريعه لطبقة الماء الملامسه لسطح التبادل الحرارى . ويستخدم الهواء فى تكثيف السائل المبرد باستعمال مروحة دفع Blower لزيادة كفاءة التكثيف بزيادة سرعة مرور الهواء على اسطح مواسير المكثف .

٤- انقاص الضغط على السائل المبرد لخفض درجة حرارة غليانه وتبخره ، وتتم هذه العمليه بسحب السائل الموجود بالمستودع تحت ضغط مرتفع الى صمام خاص يفصل منطقة الضغط المرتفع بالمكثف والقابله عن منطقة الضغط المنخفض فى البخر ويسمى هذا الصمام بصمام التمدد الترموستاتيكى او صمام الانتشار Thermal Expansion Valve.



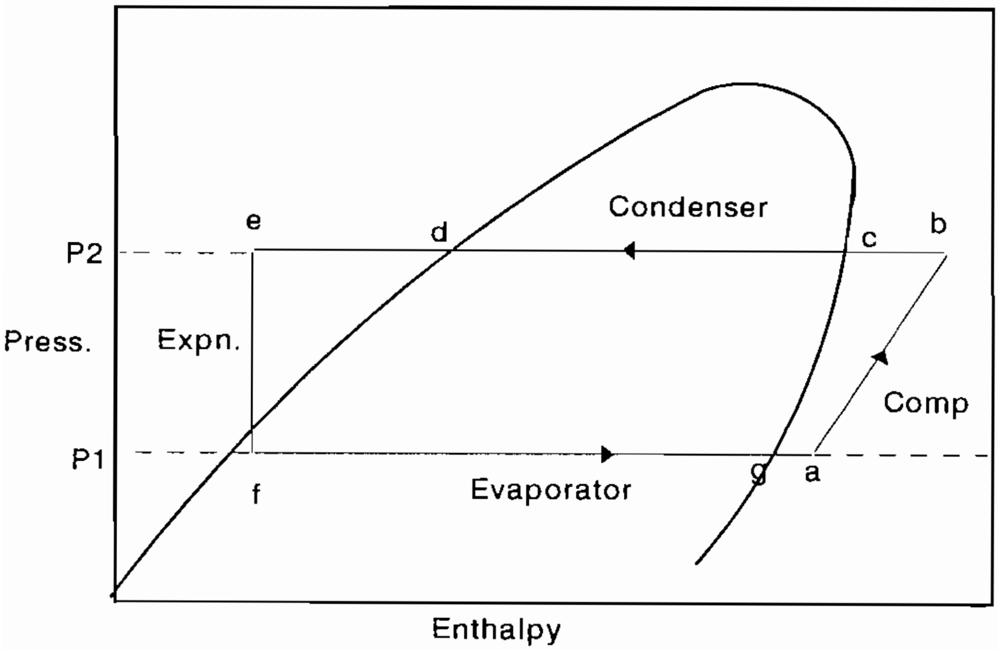
Compression Refrigeration System

شكل (١٢-١) نظام التبريد الصناعى بالضغط

ويمثل الشكل (١٢-١) رسم تخطيطى لاجزاء دورة التبريد الصناعى بالضغط ، كما يشير الرسم البيانى المقابل الى العلاقه بين الضغط وكمية الحراره للسائل المبرد اثناء مروره بالاجهزه المختلفه لدورة التبريد ، وفيه يمر السائل المبرد من القابله فى حالة بين الحالتين d ، e الى صمام الانتشار الثرموستاتيكى عند الحاله e حيث يتحول السائل المبرد الى مخلوط من السائل والغاز الى ان يصل الى الحاله g حيث

يكون عندها غاز مشبع ، ويمتص هذا الغاز الحرارة من الجو المحيط به ليصبح محمصا عند الحاله a حيث يدخل الغاز الى الضاغط ويضغط ليصل الى الحاله b . ويفقد الغاز مقدار حرارة تحميصه اثناء مروره داخل ماسورة التوصيل الى المكثف حيث يصل الى الحاله c فيتكثف الغاز عند ضغط مرتفع وثابت ليصل الى الحاله d وتتكرر الدوره مره اخرى .

يتكون المبخر عادة من مجموعه من الانابيب يتحول فيها السائل المبرد من الحاله السائله الى الحاله الغازيه ، وتوجد داخل غرفة التبريد ووظيفتة الاساسيه هو امتصاص الحراره اللازمه لتبخير السائل المبرد من الجو المحيط به (المواد المراد تبريدها).



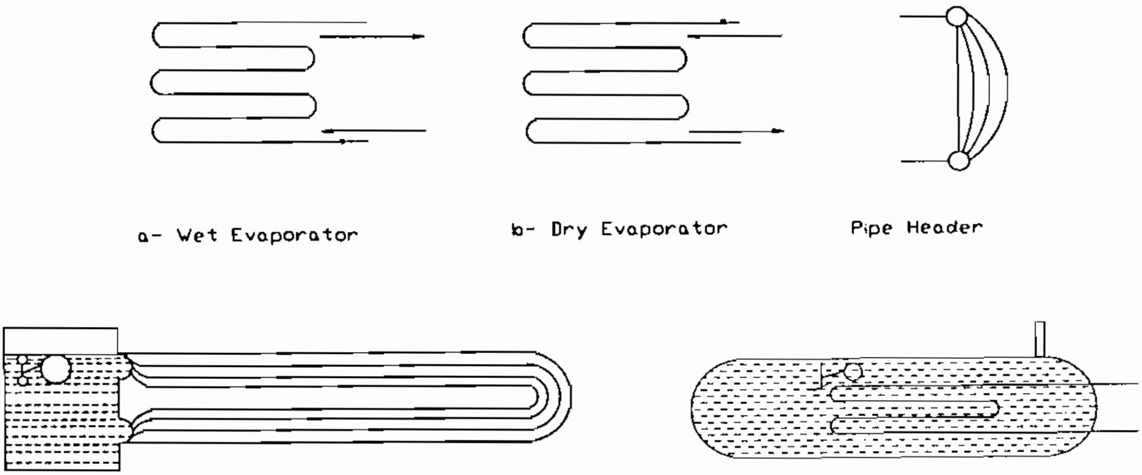
Schematic Diagm. of Refrign. Cycle

شكل (١٢-٢) تمثيل دورة التبريد على خريطة التبريد

شكل (١٢-٢) يمثل العلاقه بين الضغط الواقع على السائل المبرد وكمية الحراره

الأجزاء الرئيسيه لدورة التبريد الصناعى بالضغط :

١- المبخر أو أنابيب التبخير :



شكل (١٢-٣) نماذج لأنواع مختلفه من المبخرات

وتصنع انابيب (مواسير) التبريد عادة من النحاس الاحمر او الاصفر او الصلب او الالومنيوم. ويعتبر النحاس انسب المعادن فى حالة استخدام الفريون كسائل مبرد حيث انه لايؤثر على النحاس ، فى حين تستعمل أنابيب من الصلب فى حالة استخدام النشادر او ثانى اكسيد الكبريت وذلك لتاثير النشادر على النحاس وذلك فى حالة الرغبه فى احداث تبريد فى غرفة ما الى درجة حرارة اعلى من ٣٤°ف أو ١°م وخاصة اذا كان الهواء هو الوسيط فى نقل الحراره ويفضل استخدام مواسير مزوده بزعانف أو ريش من نفس معدن المواسير لزيادة سطح التبريد الملامس للجو المراد تبريده ، ولاتفضل الزعانف فى حالة التبريد لأقل من ٣٤°ف او الصفر المئوى وذلك لان الرطوبه الموجوده بهواء غرفة التبريد تتجمد على اسطح المواسير وزعانفها مما يتسبب عنه تقليل كفاءة التبادل الحرارى بين هواء الغرفه وسائل التبريد داخل المواسير .

وتقدر كمية التبادل الحرارى من اسطح مواسير التبريد عند ملامستها هواء ساكن بما يعادل $2.5\ BTU./hr.^{O}F\ ft^2$ من سطح المواسير أو $12\ kCal/hr.\ ^{O}C.\ m^2$، اما اذا لامست المواسير محلول ملحى او أى سائل ساكن فكمية التبادل الحرارى تزيد الى $10\ BTU./hr.^{O}F\ ft^2$ من سطح المواسير أو حوالى $50\ kCal/hr.^{O}C.m^2$ ويمكن زيادة كمية التبادل الحرارى باحداث اثاره للهواء او السائل المحيط بمواسير التبريد بواسطة التقليب بمروحة او طلمبه .

ويمكن استخدام بعض الانواع التاليه كمبخرات :

أ- <u>المبخر المبلل</u> : **Wet Evaporator**

وهو يتكون من ماسوره واحدة او عدة مواسير متصله بمجمع Header ويدخل السائل الى المواسير من اسفل ويمر الى اعلى كما هو مبين فى شكل (١٢-٣أ).

ب- <u>المبخر الجاف</u> : **Dry Evaporator**

يماثل المبخر المبلل فيما عدا دخول السائل من اعلى ومروره فى المواسير الى اسفل ويتسبب مرور السائل من اسفل الى اعلى فى زيادة كمية التبادل الحرارى وذلك نتيجة لاختلاط السائل المبرد ببخاره فيكون توزيع الحراره اكثر انتظاما داخل المخلوط كما هو مبين فى شكل (١٢-٣ب). كما انه اذا حدث وجود زيوت مختلطه بالسائل المبرد تتجمع بواسطة الجاذبيه الارضيه بأسفل المواسير وذلك فى حالة مرور السائل المبرد من اعلى الى اسفل ويمكن فصلها عن سائل التبريد بسهولة لان وجودها يسبب فى التقليل من كفاءة وحدة التبريد .

ج- <u>المبخر من النوع المغمور ذو خزان تجميع</u> :
Flooded Evaporator With An Accumulator

صمم هذا النوع بحيث يعطى كفاءة عاليه فى كمية التبادل الحرارى بين سائل التبريد والجو المحيط بالمواسير وذلك بغمر جميع اسطح المواسير الداخليه بالسائل المبرد ، وتتم عملية الغمر بواسطة صمام خاص ينظم حركته عوامه تعمل على مستوى

داخل خزان التجميع وبمستوى اعلى من مواسير المبخر وبذلك يضمن غمر السائل لسطح المواسير كما هو مبين فى شكل (١٢-٣ج).

د- المبخر من النوع الاسطوانى ذو الانابيب الداخليه :
Shell and Tube Evaporator:

وهو مماثل للنوع المغمور ، ويكون خزان التجميع فى هذه الحاله عباره عن اسطوانه تمر بداخلها مجموعة من الانابيب تحمل السائل المراد تبريده كما هو مبين فى شكل (١٢-٣د).

ويصلح هذا النوع فى تبريد السوائل مثل المحاليل الملحيه التى قد تستخدم فى عمليات تبريد اخرى ، او تبريد الماء الذى يتم رشه على الفواكه والخضروات بعد جمعها كما هى الحاله فى عمليات التبريد العاجل أو المبدئى فى الحقل Precooling.

٢- ضواغط غاز التبريد : Gas Compressors:

وقد سبق شرحها فى باب سابق ، وتوجد غالبا خارج غرفة التبريد ، وتنحصر وظيفة الضاغط فى وحدة التبريد فيما يأتى :-

أ- ايجاد منطقة ضغط منخفض داخل ملفات المبخر نتيجة سحبه للغازات المتولدة عن امتصاص سائل التبريد لحرارة التبخير .

ب- ايجاد منطقة ضغط مرتفع داخل ملفات المكثف نتيجة لضغط الغازات المسحوبه من المبخر . ويعتمد مقدار ضغط الغاز داخل الضاغط على القدرة المطلوبه للتبريد كما هو مبين فى الجدول (١٢-٢):

جدول (١٢-٢) علاقة الضغط بقدرة التبريد

الضغط المانومترى رطل قوه/بوصه^{٢}	القدرة حصان/(طن تبريد/ ساعه)	الضغط المانومترى كجم قوه/سم^{٢}	القدره حصان/(طن تبريد/ ساعه)
٢٠	١٫٠٠	٢٫٥	١٫٠٨
١٥	١٫١٢	٢٫٠	١٫٢٨
١٠	١٫٢٨	١٫٥	١٫٥٧
٥	١٫٥٤	١٫٣٣	١٫٩٧
صفر	١٫٧٦	١٫٠	٢٫٠٠
-٥	٢٫٢٧	٠٫٧	٢٫٤٥

ج- ايجاد فرق فى مقدار الضغط الواقع على سائل التبريد وبذلك يعمل على استمرار دورة التبريد بانتقال السائل المبرد من مكان الى آخر ، فيقوم الضاغط بدفع الغاز المضغوط الى المكثف ثم الى المستودع ومنه الى المبخر عن طريق صمام الانتشار .

د- يتميز الضاغط بمقدار سريان حجم معين من غاز التبريد عند ضغط سحب الغاز الى داخل اسطوانة الضاغط وكذلك مقدار التغير اللازم فى الضغط خلال دورة التبريد .

٣- المكثفات : Condensers

وتوجد عادة خارج غرفة التبريد ، ووظيفتها امتصاص الحرارة الكامنه من الغاز المضغوط وتحويله من الحاله الغازيه الى الحالة السائله مرة اخرى . وتصنع انابيب المكثف من النحاس الاحمر باستثناء الحالات المستخدمه فيها سوائل تبريد كالنشادر وثانى اكسيد الكبريت فتكون من الصلب الغير قابل للصدأ . وتزود عادة مواسير المكثف بزعانف حتى تزيد من مساحة سطح التبادل الحرارى ، ويتم التبريد باحدى الطرق الآتيه .

أ- التبريد بالهواء :

ويتكون المكثف فى هذه الحالة من مواسير افقيه ذات زعانف رأسيه لوحدات التبريد التى يلزم لها حوالى ٣ حصان كقوة محركة . ويدخل الغاز عادة من اعلى ويتكثف الغاز داخل المواسير والسوائل الناتجة من التكثف تمر الى اسفل بواسطة التثاقل الى مستودع تجميع . ويزود المكثف بمروحة لتجديد الهواء وذلك حتى تزيد كفاءة التبادل الحرارى .

ب- التبريد بالماء :

ويتخذ المكثف تصميم مماثل لتصميم المبخر من النوع الاسطوانى ذو الانابيب الداخليه والذى ذكر سابقا . والمكثفات ذات الاحجام الكبيرة وخصوصا الافقيه منها تستعمل عادة كمستودع بالاضافه الى عملها كمكثف ، وتستخدم انابيب المكثف فى هذه الحالة فى مرور الماء اللازم للتبريد او التكثيف .

٤- مستودع السائل المبرد او القابله : **Receiver**

خزان السائل المبرد ويصنع من الصلب الغير قابل للصدأ فى حالة استخدام سوائل تبريد مثل النشادر او ثانى اكسيد الكبريت ومن النحاس عامه لباقى سوائل التبريد السابق ذكرها .

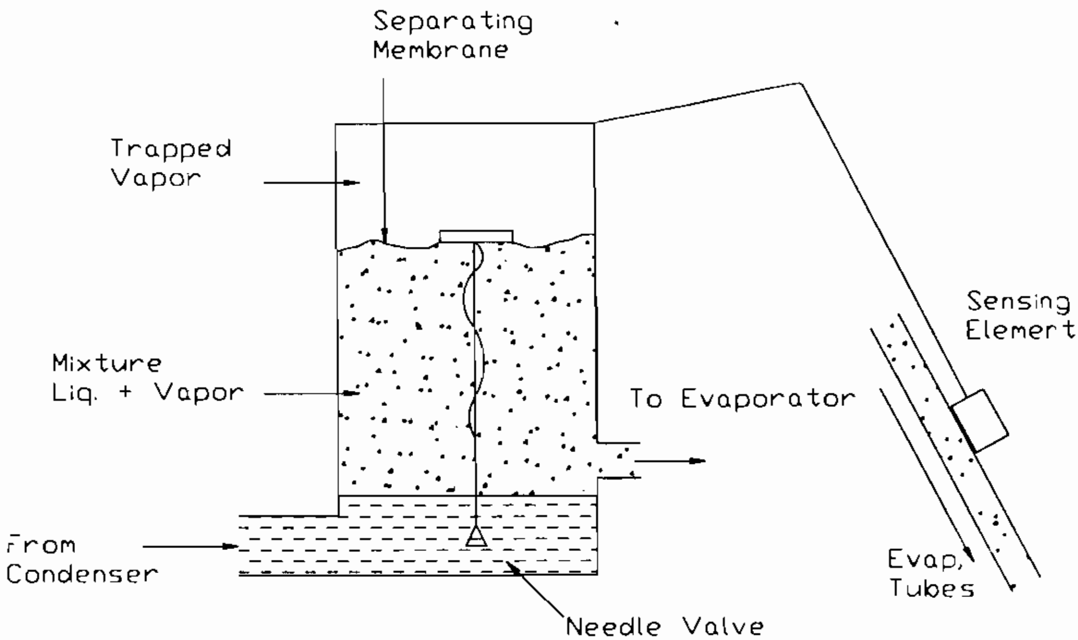
٥- صمام التمدد او الانتشار **Thermal Expansion Valve**

وتنحصر وظيفته فيما يلى :

أ - يعمل كفاصل بين منطقة الضغط المنخفض والمرتفع .

ب- يتسبب فى تخفيض الضغط المرتفع للسائل الموجود فى المستودع وذلك بان يقوم بتسريب جزء منه الى مواسير المبخر .

جـ- يعمل على تزويد المبخر بشحنه ثابته مناسبه من السائل المبرد وذلك حسب احتياجات التبريد .



شكل (١٢-٤) قطاع فى صمام التمدد أو الانتشار الثرموستاتيكى

وصمام الانتشار المعروف بالثرموستاتيكى ، يعتمد اعتمادا كليا على التغير فى درجة حرارة الغاز المتبخر من السائل المبرد نتيجة لتحميصه عند نهاية انابيب المبخر .

ويتركب من جسم الصمام وبه فتحه لدخول السائل من المكثف على ضغط مرتفع وفتحة اخرى لخروج مخلوط من السائل والغاز المبرد الى المبخر تحت ضغط منخفض، ويفصل الفتحتان عن بعضهما حاجز به ثقب رفيع يتحكم فى مقدار فتحته صمام الابره Needle Valve مثبت على غشاء مرن Diaphragm يمكن تحريكها الى أعلى واسفل ويوجد خلف هذه القاعده المرنه غرفه تتصل بجزء حساس Sensing Elementبصمام للتحكم يوجد عند نهاية انابيب المبخر ، ويوجد بهذه الغرفه غاز معين محبوس داخلها ، ويكون عادة من نفس السائل المبرد ولكن لايوجد اتصال بينه وبين السائل المبرد المار فى انابيب المبخر . وتعتمد طريقة عمل صمام الانتشار على ارتفاع درجة حرارة الوسيط نتيجة لتحميصة فاذا ارتفعت درجة حرارة الغاز الموجود فى المبخر عن الدرجة المصمم عليها فترتفع تباعا درجة حرارة الغاز المحبوس مسببا تمدده ضغطا على القاعده المرنه لصمام الابره وبذلك يفتح صمام الابره ويسمح بمرور شحنه من السائل المبرد المتكثف فتقل درجة الحراره وهكذا تستمر العمليه .

وتتوقف درجة تحميص بخار سائل التبريد داخل انابيب المبخر على :-

أ- معدل التبخير بملفات المبخر وهذا يمثل الحمل الواقع على وحدة التبريد . فكلما زاد الحمل زادت درجة تحميص الغاز ، على ذلك يسمح صمام التمدد بدخول شحنه جديده من الوسيط .

ب- معدل سريان السائل المبرد الداخل الى انابيب المبخر، فكلما زاد هذا المعدل كلما قلت درجة تحميصه ويؤدى ذلك الى تقليل او ايقاف دخول شحنه جديده من السائل المبرد الى انابيب المبخر .

ج- يؤدى عدم تشغيل الضاغط الى توقف مرور السائل خلال صمام التمدد وبذلك تتوقف وحدة التبريد كلية .

وتعتبر عملية التحكم فى معدل سريان السائل المبرد بواسطة صمام الانتشار هامة جدا وذلك لانه ، فى نظام التبريد الصناعى بالضغط ، يصمم الضاغط على اساس ضغطه للغاز فاذا ماتسربت كمية من السائل المبرد الى اسطوانة الضاغط ادى ذلك الى تلف الضاغط وبالتالى تلف وحدة التبريد كلها نتيجة لزيادة كمية تصرفه عن مقدار الحمل على المبخر اللازم لتبخره .

اقتصاديات التشغيل فى نظام التبريد الصناعى بالضغط :

يعتمد سريان السائل المبرد داخل دورة التبريد الصناعى بالضغط على ان يكون ضغط الطرد (الضغط المرتفع للغاز المبرد الخارج من الضاغط) أعلى من ضغط السحب (الضغط المنخفض للغاز المبرد الداخل الى الضاغط) . ويعتمد التشغيل الاقتصادى لوحدة التبريد على مدى النجاح فى ان يكون ضغط الطرد ثابت على اقل درجة ممكنه بالاضافه الى ثبوت ضغط السحب على اعلى درجة ممكنه بحيث يكون هناك فرق فى الضغطين حتى تتم دورة التبريد ويتحدد ضغط السحب على درجة الحرارة التى يراد الوصول اليها فى مواسير المبخر فكلما قل ضغط السحب كلما قلت درجة حرارة تشبع السائل المبرد . وبالتالى يمكن الوصول الى درجات تبريد منخفض ويتحدد ضغط الطرد على درجة حرارة الوسيط (الهواء او الماء) فى مواسير المكثف فكلما كانت درجة حرارة جو المنطقه مرتفعه كلما زاد هذا من ضغط الطرد حتى ترتفع درجة حرارة تكثيف الغاز المبرد عن درجة حرارة المنطقه .

وهناك عدة عوامل تتسبب فى رفع ضغط الطرد وبذلك تقل كفاءة التشغيل :

أ - وجود هواءٍ او غازات غير قابله للتكثيف داخل مواسير المكثف .
ب- وجود رواسب او اوساخ داخل مواسير المبخر وبذلك تقل كفاءة التبادل الحرارى
جـ- حجم مواسير المكثف اقل مما يجب .
د - تسرب بعض الزيت المستخدم فى تزييت اسطوانة الضاغط الى داخل مواسير المكثف.
هـ- تسرب جزء من السائل المبرد الى داخل الضاغط فى حالة سائله .

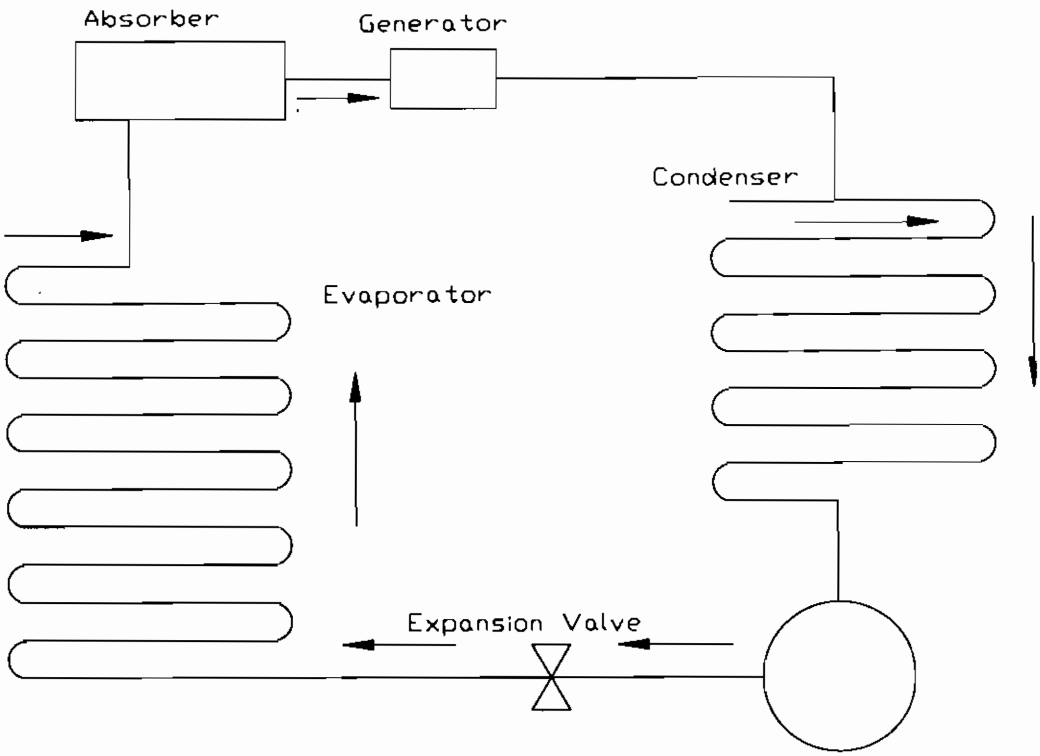
والعوامل التى تتسبب فى تقليل ضغط السحب هى :

أ - صغر حجم مواسير المبخر فتقل قدرته على التبادل الحرارى الكامل لحمل وحدة التبريد .

ب- تسرب بعض الزيت الى مواسير المبخر وخصوصا اذا كان النشادر هو السائل المبرد المستخدم فى دورة التبريد فيختلط الزيت بالنشادر مكونا مستحلبا درجة حرارة غليانه مرتفعه .

جـ- عدم ازالة طبقة الثلج التى قد تكون متكونه على اسطح انابيب المبخرمما يسبب تقليل كفاءة التبادل الحرارى .

ثانيا : التبريد الصناعي بالامتصاص : **Absorption system**



شكل (١٢-٥) التبريد الصناعى بالمتصاص

لاتختلف كثيرا النظريه الاساسيه للتبريد الصناعى بالامتصاص عن نظام الضغط باستثناء بعض النقاط التاليه :

١- يشترط فى دورة التبريد الصناعى بالامتصاص استخدام سائل مبرد له قابلية الامتصاص داخل سائل آخر مثل استخدام النشادر كسائل مبرد له قابلية الامتصاص فى الماء .

٢- لايستخدم الضاغط فى دورة التبريد الصناعى بالامتصاص ولكن يستخدم بدلا منه قابلة ومولد يقومان بوظيفة الضاغط الرئيسيه كما يأتى :

أ- يوجد بالقابله سائل الامتصاص (الماء مثلا فى حالة استخدام النشادر كسائل مبرد) وتكون مهمته امتصاص السائل المبرد المتبخر فى مواسير المبخر وبذلك يترك خلفه منطقة الضغط المنخفض فى مواسير المبخر .

ب- يقوم المولد بوظيفة الضاغط الاخرى وهى رفع درجة حرارة تكثيف السائل المبرد نتيجة لضغطه وذلك بان نسخن محلول النشادر المركز القادم من القابله فيتكون غاز النشادر مره اخرى ويتصاعد بضغط مرتفع نتيجة لعملية التسخين وعلى ذلك يتسبب فى توليد منطقة ضغط مرتفع فى الدورة .

ملحوظة :

إنه من الأهميه أن نذكر أن استخدام مائع النوشادر لايؤثر على طبقة الأوزون ويعتبر ذلك ميزه إلا أن قابليته للإنفجار تحد من استخدامه على نطاق واسع.

طرق التبريد COOLING METHODS

تقسم عادة طرق التبريد داخل وحدات التخزين ومصانع الاغذيه والالبان طبقا لطريقة مرور السائل المبرد وطريقة استخدامه داخل غرف التبريد وتشمل احدى الطريقتين التاليتين :

أولا : طريقة التبريد المباشر : Direct Cooling

وفى هذه الطريقه يمر السائل المبرد داخل ملفات المبخر الذى يوجد داخل المكان المراد تبريده ، ويتبخر السائل المبرد داخل ملفات المبخر نتيجة لامتصاصه الحرارة مباشرة من الجو المحيط بالمواد المراد تبريدها . وتستخدم هذه الطريقه فى غرف التجميد السريع لارتفاع كفاءتها ، وفى غرف التبريد الصغيره لقلة تكاليف انشائها، وفى الثلاجات المنزلية الصغيرة لبساطة تصميمها .

وتتلخص عيوب هذه الطريقة فيما يلى :

١- يلزم تشغيل وحدة التبريد ٢٤ ساعه يوميا لانه فى حالة توقف وحدة التبريد لن يتم التبادل الحرارى وبالتالى تتوقف عملية التبريد .

٢- تتعرض المواد المراد حفظها بالتبريد للتلف اذا تسربت بعض السوائل المبرده الى غرف التبريد ، وكذلك احتمال اصابة العمال القائمين بتشغيل غرف التخزين وقد تتعرض وحدة التبريد الى الانفجار او الاشتغال فى بعض الحالات عندما يكون السائل المبرد المستخدم قابل للاشتعال .

٣- صعوبة الكشف عن مكان تسرب الغاز المبرد خصوصا وان مواسير وحدة التبريد تكون ممتدة بطول غرف التبريد ويؤدى ذلك الى ارتفاع تكاليف الصيانه .

٤- يؤدى وجود وحدة التبريد قريبة من اماكن التبريد الى الاقلال من عوامل الامان والنظافه .

٥- لايمكن استعمال نسبة رطوبة مرتفعه فى حفظ المواد وذلك لان وجود الرطوبه يسبب تجميدها على مواسير التبريد ويستلزم ازالتها بصفه مستمرة.

ثانيا : طريقة التبريد غير المباشرة : Indirect Cooling

يستخدم فى هذه الطريقه وسيط مبرد مثل محلول ملحى Brine Solution فيبرد المخلوط اولا بملامسته انابيب المبخر ، ثم ينقل هذا المحلول المبرد بواسطة طلمبات خاصه الى غرف التبريد التى يوجد بها المواد المراد تبريدها . وتزود مواسير المخلوط الملحى بخزانات احتياطية يوجد داخلها ملفات مبخر وحدة التبريد ، وتعتمد وظيفة هذه الخزانات الاحتياطيه على درجة تركيز المحلول الملحى .

ويمكن الوصول الى درجة حرارة منخفضه جدا اذا كان تركيز المخلوط مرتفع دون ان يتجمد ويكون له القدرة على امتصاص كمية كبيرة من الحرارة اثناء توقف وحدة التبريد نفسها ويسمى هذا الخزان فى هذه الحالة بخزان التبريد الاحتياطى .

واذا كانت درجة تركيز المخلوط الملحى منخفضة فانه يتجمد عند تبريده ويتحوّل الى بللورات صغيره من الثلج ويكون له القدرة على امتصاص كمية من الحرارة تعادل الحرارة الكامنه اللازمه لذوبان الثلج بالاضافه الى حرارته الظاهريه ، ويسمى الخزان فى هذه الحالة بخزان التجميد الاحتياطى.

وتستخدم عدة محاليل ملحيه اهمها كلوريد الصوديوم او كلوريد الكالسيوم .
ويمكن الوصول الى درجات حرارة اقل (حوالى - ٥٨°ف أو - ٥٠°م) فى حالة استخدام كلوريد الكالسيوم ولذلك فانه يفضل استعماله عن كلوريد الصوديوم بالاضافه الى انخفاض تأثيره من جهة تآكل المعادن .

وتتميز طريقة التبريد غير المباشر بالآتى :

١- يمكن تشغيل وحدة التبريد ساعات محدودة فى اليوم وذلك لانه يمكن الاعتماد على كمية الحرارة التى تمتص بواسطة خزانات التبريد او التجميد الاحتياطيه.

٢- اذا حدث اى تسرب للغاز المبرد لايحدث عنه تلف للاغذيه ولاتتعرض العمال الى الاصابه وذلك لان وحدة التبريد تكون منفصله تماما عن غرف التبريد.

٣- يسهل الكشف عن مكان تسرب الغاز المبرد وذلك لان وحدة التبريد تشغل حيزا محدودا .

٤- يمكن بسهوله الكشف عن مكان تسرب المخلوط الملحى .

٥- فصل وحدة التبريد عن غرف التبريد يكون سببا فى زيادة عامل الامان خصوصا ضد الانفجار وكذلك يزيد من عوامل النظافه فى الاستعمال .

أما عيوب طريقة التبريد غير المباشر فتتلخص فى الآتى :-

١- كفاءة التبريد تقل كثيرا عن طريقة التبريد المباشر وذلك لوجود وسيط مبرد (المحلول الملحى) بين السائل المبرد والمادة المراد تبريدها .

٢- ارتفاع تكاليف الانشاء والصيانه والتشغيل نتيجة لوجود عدد من الخزانات الاحتياطيه واطوال كثيرة من مواسير المحلول الملحى ومايلزمها من طلمبات لدفع المحلول واجهزة لتنظيم دورة التبريد .

المواد العازله المستخدمه فى التبريد

تقوم عملية التبريد الطبيعى او الصناعى بغرضين مهمين فى وقت واحد :-

١- امتصاص الحراره من المادة المراد تبريدها وكذلك من غرفة التبريد بصفه عامة حتى تنخفض درجة حرارتها اى تبريدها .

٢- حفظ درجة حرارة غرفة التبريد ثابته بدون ارتفاع الذى قد ينتج نتيجة لتسرب كمية من الحرارة من الخارج الى الداخل عن طريق جدران وجوانب واسقف غرف التبريد .

وتزود وحدات التبريد عادة بقاطع للحمل Relay تكون ضمن مهمته فصل التيار الكهربائى عن موتور الضاغط اذا ماوصلت درجة حرارة المادة المراد تبريدها أوغرفة التبريد الي درجة حرارة التبريد المطلوبه . وحتى لاتتحمل وحدة التبريد حملا كبيرا بدون داع ، فتصمم غرف التبريد على اساس ان يكون تسرب الحرارة خلال جدرانها اقل مايمكن وذلك حتى يتركز عمل وحدة التبريد بصفه اساسيه للغرض الاول وهو عملية امتصاص الحرارة من المواد المراد حفظها بالتبريد بغرض خفض درجة حرارتها.

وتغطى جوانب غرف التبريد بمواد خاصه بحيث تكون معزوله عن الجو الخارجى للغرف ذو درجة الحراره المرتفعه .

<u>الشروط الواجب توافرها فى المواد العازله :</u>

١- رخص ثمنها حتى يمكن استخدامها تجاريا بطريقة اقتصادية.

٢- عديمة الرائحه حتى لاتكتسب المواد المراد تخزينها ، خصوصا المواد الغذائيه ، رائحة غير مرغوب فيها .

٤- غير قابله للاشتعال والتشعث .

ونذكر فيما يلى بعض المواد الشائعة الاستعمال فى العزل الحرارى :

١- **التفريغ التام** :

يعتبر ازالة الهواء المحصور فى الفراغ بين اى جدارين من اكفأ الوسائل لعزل الحرارة ، ولكن استعمال هذه الطريقة من الناحية التجاريه محدود وذلك لارتفاع تكاليف احداث التفريغ المطلوب . وتستعمل هذه الطريقة فى بعض عمليات العزل البسيطة كما فى زجاجات الحفظ (الترامس) التى تتكون من جدار مزدوج والحيز الموجود بين الجدارين مفرغ من الهواء .

٢- **الهواء** :

يعتبر الهواء الساكن من المواد العازله الجيده وطريقة استخدامه تنحصر فى عمل جدار مزدوج للمكان المراد حفظ درجة حرارته ثابته ، يحصر الهواء فى التجويف الداخلى بين جدرانه ويجب مرعاة منع اى حركة للهواء . ولرفع كفاءة عزل الغرف وحتى لاتحدث بالهواء تيارات حمل ويمكن تنفيذ ذلك بعمل حواجز صغيره بين جوانب الجدران او بملأ الغراغات بين هذه الحواجز بمواد تحجز بينها فراغات هوائيه مثل نشارة الخشب او تراب الفلين .

٣- **الفلين** :

يستعمل بكثرة فى النواحى التجاريه لعزل غرف التبريد، وتزداد كفاءته فى العزل كلما زادت مساحة الفراغات الهوائيه المقفله . ويستخدم الفلين عادة على هيئة الواح تلصق بالجدران على طبقة واحدة او عدة طبقات ، ويجب طلاء سطح الفلين الداخلى الملامس للجدار بطبقة من الاسفلت السائل كعازل للرطوبه والسطح الخارجى بطبقة من الاسمنت المخلوط بمادة عازله للرطوبه .

وعموما تستخدم الواح الفلين بسمك ٥ر٧ سم اذا كانت درجة حرارة غرفة التبريد ٢ °م فاكثر ، وسمك ١٠ سم اذا كانت درجة الحرارة اقل من ٢ °م كما يستعمل على صورة حبيبات او على هيئة تراب تملأ به الفراغات الموجوده بين جدران غرف التبريد ويراعى بالاضافه دهان الجدران بالاسفلت السائل كعازل للرطوبه .

٤- **الخشب** :

تستعمل الواح الخشب فى عزل الحراره بدرجة جيدة ويحد من استعمالها ارتفاع ثمنها وعلى النطاق التجارى لعزل ثلاجات الحفظ الصغيرة كما تستعمل الواح الخشب فى اقامة الجدران المزدوجة لغرف التبريد وتملأ الفراغات بمادة اقتصاديه مثل نشارة الخشب والتراب الفلينى . ومن عيوب الخشب انه يمتص الرطوبه بسرعة مما يفقده خاصية العزل ويمكن معالجة هذا العيب بطلاء الاوجه المعرضه للجو الرطب بطلاء خاص او تغليفها بمواد عازله اخرى مثل الورق المشمع .

٥- **الصوف الزجاجى** :

يعتبر افضل وارخص مواد العزل خاصة انه غير قابل للاحتراق . ويتواجد الصوف الزجاجى على هيئة مراتب هشه مقواه بالشبك السلك او على هيئة قوالب مضغوطه وفى هذه الحاله يجب طلائها بطبقة عازله مثل الاسفلت السائل لمنع تسرب الرطوبه داخل القوالب وخصوصا من الجانب الملاصق للسطح الاكثر ارتفاعا فى درجة الحرارة اذ ان بخار الماء يتسرب بمعدل اكثر من هذا الجانب فاذا ما وصلت الرطوبه الى الجانب الآخر الاقل فى درجة الحرارة تكثف بخار الماء مسببا فى تقليل او فقد الصوف الزجاجى خاصية العزل .

٦- **الورق** :

يتميز بخاصيته العاليه فى عزل الحرارة ولكنه قليل الاستعمال ويقتصر استعماله كمادة عازله مغلقه ، للمواد العازله الاخرى لحمايتها من الرطوبه .

٧- **السيلوتكس** : Celotex

وتعتبر هذه المادة من المنتجات المحلية المستحدثه وتختلف خاصيتها فى عزل الحرارة حسب طريقة انتاجها ، وهى عبارة عن الواح تنتج من ضغط الياف قصب السكر بعد فصل جميع المواد الغذائيه فى المصاص ، ويشابه الى حد ما الخشب الحبيبى الناتج من الياف الكتان وقش الارز وينتظر نجاح كبير من الناحيه التجاريه لهذه المواد كعازل للحرارة ويرجع ذلك الى انتاجها محليا وبثمن اقتصادى .

٨- **السيلتون** : Celton

يعتبر من المواد العازله الحديثه الاستعمال بالاضافه لرخص ثمنه غير انه اقل فى كفاءة العزل عن الفلين ويحضر من خلط الاسمنت والصودا الكاويه والسلت بنسبة معينه .

الاشتراطات الواجب توافرها فى الثلاجات التجاريه عند انشائها:

يراعى عند انشاء الثلاجات التجاريه عدة نقاط حتى يمكنها أداء وظيفتها بكفاءة عاليه وبصورة اقتصادية . وبيان هذه النقاط كما يلى :

١- ان يكون التصميم مرنا قابل للامتداد حتى يمكن التوسع فى اماكن التخزين مستقبلا .

٢- يجب مرعاة عزل الغرف المبرده بمواد جيدة العزل واقتصادية الثمن وخالية من الرائحة التى قد تنتقل للمواد المراد تخزينها .

٣- ان تكون ابواب غرف التبريد معزوله جيدا او يفضل ان تكون من النوع المزدوج حتى يقل تسرب الحرارة من الجو المحيط بالغرفه الى داخلها خصوصا عند فتح الابواب .

٤- عند تخزين ثمار الفاكهه والخضر يراعى أن تكون درجة حرارة الغرفه مناسبه للثمار المراد تخزينها حتى لاتتدهور .

٥- يشترط عند تصميم غرفة التبريد تزويدها بمراوح حتى يكون هناك حركة مستمرة للهواء تمنع تراكم الغازات الناتجه عن تنفس المواد المخزنه حول انسجة المحصول ويمكن عمل ذلك باحدى الطرق الآتيه :-

أ- تقليب هواء غرفة التبريد بمراوح حتى يكون هناك حركة مستمره للهواء تمنع تراكم الغازات الضاره حول انسجة المواد المبرده . وكذلك يساعد التقليب على ضمان احتفاظ جميع اجزاء الغرفه بدرجة الحرارة المطلوبه .

ب- تزويد غرف التبريد باجهزة خاصه تحتوى على مواد كيمائيه معينه لامتصاص هذه الغازات الضاره . وتستخدم مادة الاسكاريت Ascarite لامتصاص غاز ثانى اكسيد الكربون وهى عباره عن اسبستوس مشبع ومغطى بمادة الصودا الكاويه وتستخدم مادة الفحم البرومى المنشط Activated brominated charcoal لامتصاص غاز الايثلين .

ج- تجديد الهواء بالتهويه Ventilation وذلك لطرد نواتج العمليات الحيويه من الغازات الضارة وامدادها بهواء نظيف بصفه مستمرة .

د- تعديل هواء الغرفه والتحكم فى نسب مكوناته وذلك باستعمال غاز ثانى اكسيد الكربون او الاوزون الذى يتحد مع بعض الغازات الناتجه عن عملية التنفس وبذلك يمكن التخلص منها .

٦- يؤدى ارتفاع نسبة الرطوبه بغرف التخزين للثمار المراد تخزينها الى شدة اصابة المحاصيل بالفطريات والبكتريا ، وكذلك يؤدى انخفاض الرطوبه اكثر من اللازم الى تبخر الماء وذبول الثمار لذلك يجب مراعاة نسبة الرطوبه داخل الثلاجه ولكل محصول نسبة رطوبه معينه يمكن تخزينه عليها ، وتكون هذه النسبه عادة هى نفس نسبة مايحتويه المحصول من ماء ، وبذلك لايفقد المحصول الماء بالتبخر نتيجة لتساميها الى الجو المحيط به .

و جدول (١٢-٣) يبين درجة حرارة التخزين المثلى والرطوبه النسبيه داخل غرف التبريد ودرجة حرارة التجميد الواجب حفظ ثمار الخضر والفاكهه عليها.

جدول (١٢-٣) انسب ظروف تخزين بعض ثمار الخضر والفاكهه

المحصول	درجة الحرارة المثلى (°م)	الرطوبه النسبيه بالمخزن (٪)	طول مدة التخزين بالتقريب	المحتوى الرطوبى (٪)	الحراره النوعيه (ك.جول/كجم.°م)
البطاطس	٣-١٣	٩٠	٤-٨ شهر	٨١.٢	٠.٨٥
الجزر	صفر	٩٠-٩٥	٤-٥ شهر	٨٨.٢	٠.٩٠
اللفت	صفر	٩٠-٩٥	٤-٥ شهر	٩٠.٩	٠.٩٣
الفجل	صفر	٩٠-٩٥	١٠-١٢ شهر	٧٣.٤	٠.٧٨
البنجر بعروش	صفر	٩٠-٩٥	١٠-١٤ يوم	-	-
بدون عروش	صفر	٩٥	٣-٥ شهر	٨٧.٦	٠.٩٠
البصل	صفر	٦٥-٧٠	٦-٨ شهر	٨٧.٥	٠.٩٠
الثوم	صفر	٦٥-٧٠	٦-٨ شهر	٧٤.٢	٠.٧٩
الكرنب	صفر	٩٠-٩٥	٣-٤ شهر	٩٢.٤	٠.٩٤
القنبيط	صفر	٩٠-٩٥	٢-٤ أسبوع	٩١.٧	٠.٩٣
كرنب بروكس	صفر	٩٠-٩٥	٣-٤ أسبوع	٨٤.٩	٠.٨٧
البروكلى	صفر	٩٠-٩٥	٧-١٠ يوم	٨٩.٩	٠.٩٢
الخرشوف	صفر	٩٠-٩٥	١-٢ أسبوع	٨٣.٧	٠.٨٧
الخس	صفر	٩٥	٢-٣ أسبوع	٩٤.٧	٠.٩٦
البقدونس	صفر	٩٠-٩٥	١-٢ شهر	٨٥.١	٠.٨٨
الكرفس	صفر	٩٠-٩٥	٢-٤ شهر	٩٣.٧	٠.٩٥
السبانخ	صفر	٩٠-٩٥	١٠-١٤ يوم	٩٢.٧	٠.٩٤
الشليك	صفر	٩٠-٩٥	٥-٧ يوم	٨٩.٩	٠.٩٢
الطماطم الخضراء	١٤-١٦	٨٥-٩٠	٢-٣ أسبوع	٩٤.٧	٠.٩٥
الطماطم ناضجه	٧-١٠	٨٥-٩٠	٢-٧ يوم	٩٤.٧	٠.٩٥
الباذنجان	٧-١٠	٩٠	٧ يوم	٩٢.٧	٠.٩٤
الفلفل	٧-١٠	٩٠-٩٥	٢-٣ أسبوع	٩٢.٤	٠.٩٤
الخيار	٧-١٠	٩٠-٩٥	١٠-١٤ يوم	٩٦.١	٠.٩٧
قرع الكوسه	٧-١٣	٨٠-٨٥	١٥-٢١ يوم	٩٥.٠	٠.٩٦
القرع العسلى	١٠-١٣	٧٠-٧٥	٢-٦ شهر	٩٠.٥	٠.٩٢
الكانتلوب	صفر-٥	٨٥-٩٠	٥-١٥ يوم	٩٢.٠	٠.٩٣
الشمام	٧-١٠	٨٥-٩٠	٢ أسبوع	٩٢.٧	٠.٩٤
كيزان العسل	٧-١٠	٨٥-٩٠	٣-٤ أسبوع	٩٢.٦	٠.٩٤
البطيخ	٥-١٠	٨٠-٨٥	٢-٣ أسبوع	٩٢.١	٠.٩٧

تابع ماقبله

المحصول	درجة الحرارة المثلى (°م)	الرطوبه النسبيه بالمخزن (٪)	طول مدة التخزين بالتقريب	المحتوى الرطوبى (٪)	الحراره النوعيه (ك.جول/كجم °م)
لبسله	صفر	٩٠-٩٥	١-٢أسبوع	٧٤.٣	٠.٧٩
الفاصوليا	٧-١٠	٩٠-٩٥	٨-١٠يوم	٨٨.٩	٠.٩١
الفول الرومى	صفر-٥	٩٠	١٠-١٥يوم	٦٦.٥	٠.٧٣
لباميه	٧-١٠	٩٠-٩٥	٧-١٠ يوم	٨٩.٨	٠.٩٢
البطاطا	١٣-١٦	٨٥-٩٠	٤-٦شهر	٦٨.٥	٠.٧٥
البرتقال	صفر-١	٨٥-٩٠	٨-١٢أسبوع	٨٧.٢	٠.٩٠
لليمون الاضاليا	٩-١٥	٨٥-٩٠	١-٤ شهر	٨٩.٣	٠.٩٢
المالح البلدى	٩-١٠	٨٥-٩٠	٦-٨أسبوع	٨٦.٠	٠.٨٩
الجريب فروت	١٠	٨٥-٩٠	٤-٨أسبوع	٨٨.٨	٠.٩١
اليوسفي	صفر-٤	٨٥-٩٠	٣-٤ أسبوع	٨٧.٣	٠.٩٠
المانجو	١٣	٨٥-٩٥	٢-٣أسبوع	٨١.٤	٠.٨٥
الموز	صفر	٨٥-٩٥	-	٧٤.٨	٠.٨٠
الزيتون	٧-١٢	٨٥-٩٥	٤-٦أسبوع	٧٥.٢	٠.٨٠
الزبديه	٧-١٣	٨٥-٩٥	٤ أسبوع	٦٥.٤	٠.٧٢
الباباظ	٧	٨٥-٩٥	٢-٣أسبوع	٩٠.٨	٠.٨٢
لكمثرى	-٢ -صفر	٩٠-٩٥	٢-٧شهر *	٨٢.٧	٠.٨٦
التفاح	-١-صفر	٩٠	٢-٨شهر *	٨٤.١	٠.٨٧
السفرجل	صفر	٩٠	٢-٣ شهر	٨٥.٣	٠.٨٨
الكريز	صفر	٩٠	١٠-١٤يوم	٨٣.٠	٠.٨٧
المشمش	صفر	٩٠	١-٢أسبوع	٨٥.٤	٠.٨٨
الخوخ	صفر	٩٠	٢-٤ أسبوع	٨٦.٩	٠.٩٠
البرقوق	صفر	٩٠-٩٥	٣-٤ أسبوع	٨٥.٧	٠.٨٨
التين	صفر	٨٥-٩٠	٧-١٠ يوم	٨٧.٠	٠.٨٢
العنب	-١-صفر	٩٠-٩٥	٥ر١-٦شهر *	٨١.٦	٠.٨٦
الرمان	١-٢	٩٠	٢-٤ شهر	-	-
لكاكى	-١	٩٠	٣-٤ شهر	٧٨.٢	٠.٨٤
لنقل	صفر-١٠	٦٥-٧٥	٨-١٢شهر	٣-٦	٠.٢٢-٠.٢٥
التمار المجففه	صفر	٥٠-٦٠	٩-١٢شهر	١٤-٢٦	٠.٣١-٠.٤١

* حسب الصنف

المصدر : الحاصلات البستانيه (أ.د. صلاح النبوى وآخرون)

حمولة التبريد
REFRIGERATION LOAD

وتعرف حمولة التبريد بانها مقدار كمية الحرارة التى يجب التخلص منها فى الثلاجات او غرف التبريد لحفظ مادة معينه عند درجة حرارة مناسبة طوال فترة التخزين. وتعتمد حمولة التبريد على عدة عوامل اهمها مايأتى :

١- مدى كفاءة اجهزة وحدات التبريد .
٢- حجم غرف التخزين .
٣- نوع وصنف المحصول المراد تخزينه (حرارته النوعيه ، حرارته الكامنه ، درجة حرارة التخزين).
٤- درجة حرارة الجو الخارجي المحيط بغرف التبريد وعدد المرات التى يفتح ويقفل فيها ابواب الثلاجات .

وتحدد سعة وحدة التبريد باحدى الطرق الآتيه :

١- كمية الحرارة التى تمتصها الآله فى الساعه اما بالوحدات البريطانيه او الوحدات المتريه او الوحدات المختلطه أو الوحدات الدوليه.

٢- التبريد الكمى بالرطل او الكيلوجرام فى الساعه علما بان رطل التبريد يلزمه ١٤٤وحدة حراريه بريطانيه BTU أو الكيلوجرام تبريد يلزمه ٧٩ر٩ كيلوكالورى .k.Cal.
وهى كمية الحرارة اللازمه لانصهار وحدة وزنيه واحده من الثلج .

٣- كمية التبريد بالطن تبريد فى اليوم

$$\text{Short ton} = 2000\ \text{Lb} \times 144\ \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}} = 288000\ \text{BTU}$$

$$= ٢٠٠٠\ \text{Lb} \times ١٤٤\ \frac{\text{BTU}}{\text{Lb}}$$

$$= ٢٨٨٠٠٠\ \text{BTU}$$

حيث يعتبر الطن القصير Short ton (الطن الأمريكى) يساوى ٢٠٠٠ رطل
والطن الكامل أو الطن العادى (الطن الانجليزى) يساوى ٢٢٤٠ رطل

$$= 1000\ kg \times 79.9\ \frac{kcal}{kg}$$

$$= 79900\ kcal$$

$$\sim 80000\ kcal$$

والحراره التى يجب ازالتها بالتبريد هى عبارة عن مجموع الاحمال الآتيه:

أولا : حرارة الحقل : Field Heat

وهى الحرارة المخزونه فى المحصول نتيجة تعرضه للشمس وتبينها درجة حرارة الثمار . وتتأثر كمية حرارة الحقل بالوقت اللازم لجمع الثمار ومدى تعرضها للشمس، ويمكن تقليلها بجمع الثمار فى وقت مبكر من الصباح ووضع المحصول فى الظل .

وتعتمد حمولة التبريد اللازمه لازالة حرارة الحقل على :

١- درجة الحرارة الابتدائيه للثمار .
٢- درجة الحرارة النهائيه للثمار او درجة الحراره المراد تخزين الثمار عندها .
٣- وزن الثمار وادوات التعبئه والتغليف .
٤- الحراره النوعيه للثمار وادوات التعبئة والتغليف ويمكن تقديرها اذا علم (M_C)المحتوى الرطوبى للثمار حسب المعادله التقريبيه الآتيه :

$$\text{Special heat} = (M_C \times 0.008) + 0.2$$

ويرمز المقدار الثابت ٢ر. الى الحرارة النوعيه الجافه تماما فى الثمار المراد تخزينها .

٢- الحرارة الحيوية: Vital Heat

تؤدى الثمار المختلفه كأى كائنات حيه ، عملياتها الحيويه المختلفه بعد جمعها واثناء تخزينها وتؤدى عملية التنفس Respiration الى احتراق المكونات العضويه للمحصول ويتأكسد السكر الى غاز ثانى اكسيد الكربون وماء ويصحب ذلك توليـــد

طاقة حرارية ناتجة عن عملية التنفس وتسمى هذه الطاقة بالحرارة الحيوية . وهى تمثل جزء مهم فى حمولة التبريد اللازمة لغرف التخزين . ويمكن قياس الحرارة الحيويه باستخدام اجهزة خاصه تسمى Calorimeters او تقديرها حسابيا بمعرفة كمية غاز ثانى اكسيد الكربون المتولد عن التنفس . والطريقة الاخيرة اسرع واسهل ولايتعدى الخطأ فى حسابها عن ١٠٪ من القيمة الحقيقيه للحرارة الحيويه وهذا الخطأ ناتج عن افتراض ان جميع الحرارة المتولدة اثناء التنفس تكون ناتجة عن احتراق سكر الجلوكوز

وتعتمد كمية الحرارة الحيويه على مايأتى :

١- مادة التخزين .
٢- كمية المحصول المراد تخزينها .
٣- سرعة تنفس المحصول وتقدر بحجم غاز الاكسجين الممتص او حجم غاز ثانى اكسيد الكربون المتولد من تنفس وزن معين من المحصول فى وحدة زمنيه واحدة .

ثانيا : الحرارة النافذه : Heat Leakage

وهى مجموع كميات الحرارة التى تنساب او تنفذ داخل غرف التبريد الثابتة او المتنقله (عربات النقل وعربات السكك الحديديه ...الخ) وتشمل الآتى :

١- الحرارة التى تنفذ الى داخل غرف التبريد خلال الاسقف والجدران والارضيه :

وتكون ذات اهمية كبيرة فى الظروف الآتيه :

أ- ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجى لغرف التبريد .

ب- انخفاض درجة حرارة هواء غرفة التبريد (كما هى الحاله فى غرف التجميد)

ج- استعمال غرف التبريد المتنقله (عربات النقل وعربات السكك الحديديه) ، فيؤدى سرعة الهواء خارج الغرف الى ارتفاع كمية الحرارة النافذه من جانب واسقف غرف التبريد.

وتعتمد كمية الحراره النافذة داخل غرف التبريد على العوامل الآتيه :

أ- الفرق بين درجة حرارة الجو الخارجى للغرفه ودرجة حرارة هواء غرفة التبريد ، فكلما زاد هذا الفرق كلما زادت كمية الحرارة المتسربه .

ب- مساحة الاسطح الخارجيه لغرف التبريد.

ج- مدة التخزين .

د- نوع المادة المستخدمه فى عزل غرفة التبريد (مقاومتها لانتقال الحراره).

هـ- معدل انتقال الحراره من الهواء الخارجى للغرفه الى داخل الغرفه وهذا المعدل يعتمد على سرعة الهواء الملامس لجدران الغرفه من داخلها وخارجها وكثافته ولزوجته التى تتأثر بدرجات الحرارة هذا بالاضافه الى حرارته النوعيه . ويعبر عنها بمعامل انتقال الحرارة بالحمل الذى سبق ذكره سابقا .

٢- <u>حرارة الخدمه</u> : Service Heat

وهى كمية الحرارة المتسربه نتيجة لفتح ابواب غرف التبريد ومن عملية تجديد هواء الغرفه بالاضافه الى العنصر البشرى اى حرارة تنفس العمال وكذلك الحرارة المتولدة عن إدارة ماكينات التبريد ومراوح التقليب والتهويه والحرارة الناتجة عن الاضاءه .

ويمكن تقدير كمية حرارة الخدمه بماقيمته ١٠ الى ١٥٪ وقد تصل الى ٢٠٪ من مجموع الحرارة النافذة خلال جدران الغرفه وحرارة تنفس المواد المخزونه .

٣- <u>احتياطى طوارىء</u> : Reserves

ويقدر بحوالى ٢٠٪ الى ٣٥٪ من مجموع الاحمال السابقه لمراعاة الظروف التى قد تستجد مثل ارتفاع درجة حرارة الجو الخارجى (فترة الصيف مثلا) او زيادة غير منتظره فى حرارة الحقل نتيجة جمع الثمار فى فترة الظهيره .

مثال (١)

المطلوب تقدير سعة وحدة التبريد المناسبة لغرفة أبعادها الداخليه ٢ × ٣ × ٣ متر وحوائطها وسقفها من الخشب بسمك ٥ر٧سم ومغطاه بألواح من الفلين من الداخل بسمك ١٠ سم والغرفه معده لحفظ ٢ طن ثمار البرتقال عند درجة حرارة ٥°م بينما درجة حرارة الجو الخارجي للغرفه ٣٠°م وبحيث يسحب طن واحد من البرتقال كل يوم ويستبدل بنفس الكميه وبحيث يتم التبريد خلال ٦ ساعات علما بأن :

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للخشب	=	٢٥ر٠	كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للفلين	=	١٠ر٠	كيلوكالورى/ساعه.متر.°م
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجي	=	٥ر٢	كيلوكالورى/ساعه.متر^{٢}.°م
معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الداخلي	=	٥ر١	كيلوكالورى/ساعه.متر^{٢}.°م
الحراره النوعيه للبرتقال	=	٩ر٠	كيلوكالورى/كجم.°م
حرارة تنفس ثمار البرتقال	=	٤٠٠	كيلوكالورى/طن.يوم

مع اعتبار اضافة ٢٠٪ من كميات الحرارة نتيجة لفتح أبواب الغرفه والتهويه واحتياطى وحدة التبريد .

الحل

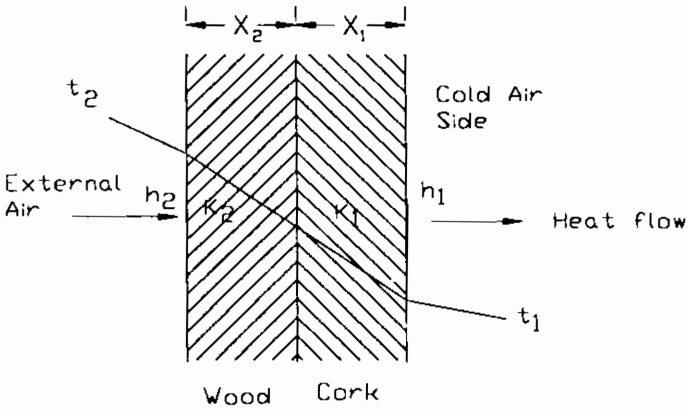
$$\text{Field heat} = \frac{\text{Mass of Oranges x specific heat x temp. difference}}{\text{Cooling hours}}$$

$$= \frac{1000 \times 0.9 \times (30 - 5)}{6} = 3750 \quad \text{kcal/hr}$$

$$\text{Heat of respiration of orange} = 1 \times \frac{400}{24} = 16.7 \ \text{kcal/hr}$$

كمية الحرارة النافذه يمكن حسابها كما يأتى :

$$\text{Heat leakage (Q)} = \frac{A.\ (t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{1}{h_2}}$$



Walls area of refrigeration room = 2 x 3 x 4 = 24 m^2

Ceiling and floor areas of room = 3 x 3 x2 = 18 m^2

Total surface area = 24 + 18 = 42 m^2

يمكن حساب الحرارة النافذة كالآتى :

$$Q = \frac{(42)\ (30 - 5)}{\frac{1}{2.5} + \frac{10}{(100)(0.1)} + \frac{7.5}{(100)(0.25)} + \frac{1}{1.5}}$$

$$= \frac{(42)\ (25)}{0.4 + 1 + 0.3 + 0.67}$$

$$Q = 443 \quad \text{kcal./hr.}$$

Total heat to be absorbed per hour during cold storage

= Field heat + Heat of respiration + Heat leakage

= 3750 + 16.7 + 443

= 4209.7 kcal/hr

∴ Refrigeration Capacity

$$= \frac{\text{Total Heat Absorbed x Hours/day}}{\text{Heat in Ton Refrigeration}}$$

Correction should be made for reserves

$$\therefore \text{Refrigeration Capacity} = \frac{(4209.7)\ (1.2)(24)}{(80000)} = 1.515 \quad \text{Ton}$$

أى يلزم اقامة وحدة تبريد مقدار حمولتها حوالى ٥ر١ طن تبريد فى اليوم ويتلاحظ أن كمية الحرارة النافذه تمثل جزءا هاما فى الحمل الاجمالى لوحدة التبريد فى حين أن حرارة التنفس للمحصول تكون صغيره إلى حد ما . غير أن هذه الحراره تكون ذات أهمية كبيرة إذا كانت كمية الثمار المخزنه كبيرة خاصة إذا ما إرتفعت درجات حرارة التخزين عن ١٠ ^{o}م كما هي الحاله عند تخزين ثمار الفراوله مثلا.

مثال (٢) :

وحدة تبريد صناعى بالضغط تعمل بطريقة التبريد غير المباشر وتتكون من جهاز للتبريد مزود بخران به محلول ملحي حول مبخر جهاز التبريد وطلمبة لدفع المحلول الملحى خلال مواسير غرفة التبريد .

أذا كانت أبعاد غرفة التبريد ٦ × ٥ × ٣ متر حوائطها مبنيه من الطوب الحرارى بسمك ٢٥سم ومغطاه من الخارج بطبقة من المونه بسمك ٥ر٢سم ، ومن الداخل بألواح الفلين بسمك ٥ر٧سم . والغرفه معدة لحفظ ٢ طن من ثمار الفراوله عند درجة حرارة ١٠ ^{o}م بينما درجة حرارة الجو الخارجى للغرفه ٣٥ ^{o}م وتستغرق عملية خفض درجة حرارة الفراوله خمسة ساعات .

اذا كانت طول المواسير الحامله للمحلول الملحى ٣٠ متر وقطر الماسورة ٥ر٧سم ومعزوله بطبقة من الصوف الزجاجى مقدارها ٥ر٧سم كذلك كانت درجة حرارة المحلول الملحى داخل مواسير التوصيل صفر ^{o}م ودرجة حرارة الجو الخارجى ٣٥ ^{o}م .

احسب سعة وحدة التبريد بالطن تبريد فى اليوم علما بأن :

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للطوب الحرارى = ١٨ر. كيلوكالورى/ساعه.متر. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للمونه الاسمنتيه= ٥٥ر. كيلوكالورى/ساعه.متر. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل لألواح الفلين = ١٠ر. كيلوكالورى/ساعه.متر . ^{o}م

سمك معدن المواسير الحامله للمحلول الملحى = ٥٠ر. سم

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل لمعدن المواسير= ٥ر١٢ كيلوكالورى/ساعه.متر. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى= ١٠ر. كيلوكالورى/ساعه.متر. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجى = ٥ر٢كيلوكالورى/ساعه.متر ^{٢}. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالحمل لهواء غرفة التبريد = ٥ر١ كيلوكالورى/ساعه.متر ^{٢}. ^{o}م

معامل إنتقال الحرارة بالحمل للمحلول الملحى =٢٥ر٥كيلوكالورى/ساعه.متر ^{٢}. ^{o}م

الحراره النوعيه للفراوله = ٩ر. كيلوكالورى/كجم. ^{o}م

حرارة تنفس ثمار الفراوله عند ١٠ ^{o}م = ٢٥٠٠ كيلوكالورى/طن فى اليوم

مع إعتبار إضافه ٢٥٪ من كميات الحرارة كاحتياطى لوحدة التبريد وحرارة الخدمه .

الحـــل

$$\text{Field heat} = \frac{2000 \times 0.9 \times (35 - 10)}{5} = 9000 \text{ kcal/hr}$$

$$\text{Heat of respiration} = \frac{2 \times 2500}{24} = 208.33 \text{ kcal/hr}$$

كمية الحرارة النافذه (Q):

١- من أسطح وجوانب وأرضية غرفة التبريد

$$Q = \frac{A\,(t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1} + \frac{X_1}{k_1} + \frac{X_2}{k_2} + \frac{X_3}{k_3} + \frac{1}{h_2}}$$

Area of walls of refrigeration room = 5 x 3 x 2 + 6 x 3 x 2

=30 + 36 = 66 m^2

Area of ceiling and floor of refrigeration room = 5 x 6 x 2

= 60 m^2

Total surface area = 66 + 60 = 126 m

$$\therefore \quad Q = \frac{(126)\,(35 - 10)}{\frac{1}{2.5} + \frac{25}{(100)(0.18)} + \frac{2.5}{(100)(0.55)} + \frac{7.5}{(100)(0.10)} + \frac{1}{1.5}}$$

$$Q = \frac{(126)\,(25)}{0.4 + 1.39 + 0.045 + 0.75 + 0.67}$$

$$Q = \frac{(126)\,(25)}{3.255}$$

$$Q = 967.7 \quad \text{kcal/hr.}$$

٢- من مواسير توصيل المحلول الملحى إلى غرفة التبريد
وتستخدم المعادله الخاصه بالانتقال القطرى للحرارة من المواسير

$$Q = \frac{2\pi L\ (t_2 - t_1)}{\frac{1}{h_1 r_1} + \frac{\ln\ r_2/r_1}{k_1} + \frac{\ln\ r_3/r_2}{k_2} + + \frac{1}{h_2 r_2}}$$

$$= \frac{(2)\ (3.14)\ (30)\ (35 - 10)}{\frac{100 \times 2}{(5.25)\ (7.5)} + \frac{\ln\ 8.5/7.5}{12.5} + \frac{\ln\ 23.5/8.5}{0.01} + \frac{100 \times 2}{(1.5)\ (23.5)}}$$

$$= \frac{(2)\ (3.14)\ (30)\ (25)}{5.08 + 0.01 + 101.7 + 5.67} = \frac{4710}{112.46}$$

$$Q = 41.88 \quad \text{kcal/hr.}$$

حيث ان :

$$r_1 = \frac{7.5}{2} = 3.75 \quad \text{cm}$$

$$r_2 = \frac{7.5}{2} + 0.5 = 4.25 \quad \text{cm}$$

$$r_3 = \frac{7.5}{2} + 0.5 + 7.5$$

$$= 11.75 \quad \text{cm}$$

Total heat to be absorbed per hour

= Field heat + Heat of respiration + Heat leakage

= 9000 + 208.33 + (967.7 + 41.88)

= 10217.91 kcal/hr

$$\therefore \text{Refrigeration Capacity} = \frac{(10217.91)\ (1.25)(24)}{(80000)} = 3.83 \quad \text{Ton}$$

ويلاحظ أن الزيادة فى حمل التبريد كان نتيجة ارتفاع كمية الحرارة النافذه إلى غرفة التبريد مما يدل على أن كمية العزل الحرارى للغرفه كانت غير كافيه.

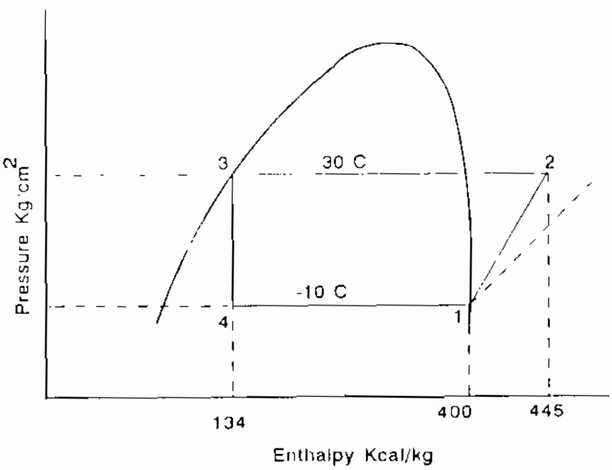
مثال (٣)

ثلاجة تبريد للمواد الغذائيه تتحمل حمل تبريد قدره ١٢ طن تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر كانت ٣٠ °م ، -١٠ °م على الترتيب . فإذا كان الضاغط المستخدم ذو اسطوانتين فردى التأثير ويدور بسرعه ٩٠٠ لفه/دقيقه وكان ارتفاع درجة حرارة مياه التبريد فى المكثف ٥ °م . وكان مائع التبريد المستخدم هو الأمونيا (غاز النوشادر) إحسب :

أ - سعة وحدة التبريد
ب- كمية الحرارة المفقوده فى المكثف
ج - معامل أداء الثلاجه
د - معدل سريان مائع التبريد اللازم فى الدقيقه
هـ- القدرة المطلوبه للضاغط مقدره بالحصان الميكانيكى
و - أبعاد اسطوانة الضاغط اذا كانت نسبة طول المشوار الى القطر = ١ر٢
ز - معدل سريان مياه التبريد فى المكثف

الحل

ترسم دورة التبريد على الخريطة الخاصه بالأمونيا على أساس أن شغل الضاغط يبدأ من منحنى التشبع للغاز عند درجة حرارة المبخر ويتبع منحنى الأنتروبيا الثابت عند هذه النقطة (1) حتى يصل إلى الحالة (2) عند درجة حرارة المكثف . ويتكثف مائع التبريد حتى يصل إلى الحالة (3) ويكون السائل مشبعا يتم خفض ضغطه حتى يصل الى الحاله (4) عند ضغط المبخر كما هو مبين فى الشكل :



أ- **سعة التبريد** :

Cooling or Refrigeration Capacity

$$Q_c = h_1 - h_4$$
$$= 400 - 134$$
$$Q_c = 266 \quad kcal/kg.$$

ب- **كمية الحرارة المفقوده فى المكثف** :

Heat Absorbed in Condenser

$$Q_a = h_2 - h_3$$
$$= 445 - 134$$
$$Q_a = 311 \quad kcal/kg.$$

ج- **معامل أداء الثلاجه** :

Coefficient of Performance

$$C.O.P. = \frac{\text{Refrig. Capacity}}{\text{Work done in Compn.}}$$

$$= \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$

$$= \frac{400 - 134}{445 - 400}$$

$$= \frac{266}{45}$$

$$C.O.P. = 5.91$$

د- **معدل سريان مائع التبريد** :

Refrigeration load = Rate of flow refrigerant x Refrigeration Capacity

$$\therefore \quad \frac{(12) \times (80,000)}{(24)} = \text{Refrigerant Rate} \times (266)$$

$$\therefore \quad \text{Refrigerant Rate} = \frac{(12)\ (80,000)}{(24)\ (266)}$$

$$= 150.38 \quad \text{kg./hr.}$$

$$= 2.51 \quad \text{kg./min.}$$

هـ- <u>القدرة النظريه اللازمه للضاغط</u> :

Theoretical HP. for the Compressor

$$= \frac{\text{Ref. Rate x Work done (ht. units)}}{\text{Standard HP.}}$$

$$= \frac{(2.51)\ (445 - 400)\ (427)}{75 \times 60}$$

$$= 10.71 \quad \text{HP.}$$

و- <u>لايجاد قطر وطول مشوار مكبس الضاغط</u> :

نوجد حجم الاسطوانه وذلك من معرفة الحجم النوعى للغاز على خريطة التبريد بواسطة مائع الأمونيا عند النقطه (١) وتكون مساويه 0.425 متر مكعب/كجم .

.. Refrigerant Rate (by weight)

$$= \frac{\text{Cyl. Vol. x No. of Cyl. x RPM x No. of effects}}{\text{Sp. Vol.}}$$

$$\text{Cyl. Vol.} = \frac{(2.51)\ (0.425)}{2 \times 900 \times 1} = 0.000593 \ m^3$$

$$\text{Cyl. Vol.} = \frac{\pi}{4} D^2 L$$

$$0.000593 = \frac{\pi}{4} D^2 \ (1.2\ D)$$

$$\therefore \ D^3 = \frac{(0.000593)\ (100^3)\ (4)}{(1.2)\ (\pi)}$$

$$= 629.51$$

$\therefore$ D = 8.57 cms.

& L = (1.2 x 8.57)

L = 10.28 cms.

ز- **لايجاد معدل سريان مياه التبريد فى المكثف**:

يتم اجراء موازنه حراريه على المكثف كما يلي :

Heat absorbed by cooling water

= Heat lost from refrigerant

$\therefore$ (Refrigerent Rate) $(h_2 - h_3)$

= Cooling water rate x C_p. ht. x Δt

$\therefore$ (2.51) (445 - 134) = (Cooling water rate) (1) (5)

$$\therefore \text{Cooling water rate} = \frac{(2.51)\ (311)}{(5)}$$

= 156.12 kg./min.

مثال (٤):

إعادة حل المسأله المنصوص عليها فى مثال (٣) مع استخدام مائع التبريد ركلين ١٣٤(أ) – Reclin 134a بدلا من غاز النوشادر .

الحل

إشارة إلى كروكى مثال (٣) وباستخدام الخريطه الخاصه بركلين ١٣٤-أ نحصل على البيانات الآتيه بالنسبه لانثالبيا المائع :

h_1 = 391 kJ/kg $= \frac{391}{4.188}$ = 93.36 kcal/kg

h_2 = 419 kJ/kg = 100 kcal/kg

h_3 = 242 kJ/kg = 57.78 kcal/kg

h_4 = 242 kJ/kg = 57.78 kcal/kg

أ- سعة التبريد :

$$Q_c = h_1 - h_4$$
$$= 93.36 - 57.78$$
$$\therefore \quad Q_c = 35.58 \quad kcal/kg$$

ب- كمية الحرارة المفقوده فى المكثف :

$$Q_a = h_2 - h_3$$
$$= 100 - 57.78$$
$$\therefore \quad Q_a = 42.22 \quad kcal/kg$$

ج- معامل أداء الثلاجه :

$$C.O.P. = \frac{h_1 - h_4}{h_2 - h_1}$$
$$= \frac{93.36 - 57.78}{100 - 93.36}$$
$$\therefore \quad C.O.P. = \frac{35.58}{6.64} = 5.36$$

د- معدل سريان مائع التبريد

$$\text{Refrigerant Rate} = \frac{(12)\ (80,000)}{(24)\ (35.58)}$$
$$= 1124.23 \quad kg/hr$$
$$= 18.74 \quad kg/min.$$

هـ- القدرة النظريه اللازمه للضاغط

$$\text{Theoretical H.P} = \frac{\text{Ref. Rate x Work Done (ht. Units)}}{\text{Standard HP.}}$$
$$= \frac{(18.74)(h_2 - h_1)(427)}{(75)(60)}$$
$$= \frac{(18.74)(100 - 93.36)(427)}{(75)(60)}$$
$$= 11.81 \quad HP$$

و- لايجاد قطر وطول مشوار مكبس الضاغط

من خريطة مانع التبريد نجد أن الحجم النوعى للغاز عند النقطه (١) تكون مساويه ١٠٠ ديسمتر مكعب/كجم أى ١ر٠ متر مكعب/كجم.

$$\therefore \text{ Cyl. Vol.} = \frac{(18.74)(0.1)}{2 \times 900 \times 1} = .00104 \text{ m}^3$$

$$= \frac{\Pi}{4} D^2 L$$

$$= \frac{\Pi}{4} D^2 (1.2 D)$$

$$\therefore D^3 = 1104.03$$

$$D = 10.31 \text{ cm}$$

$$L = 12.37 \text{ cm}$$

ز- معدل سريان مياه التبريد فى المكثف

بعمل الموازنه الحراريه على المكثف

$$\therefore (18.74)(93.36 - 57.78) = (\text{Cooling water rate})(1)(5)$$

$$\therefore \text{ Cooling water rate} = \frac{(18.74)(35.58)}{(5)}$$

$$= 133.35 \text{ kg/min.}$$

<u>التحكم فى درجات الحرارة والرطوبه داخل غرف التخزين بالتبريد:</u>

يجب العمل على التحكم فى درجات الحرارة والرطوبه داخل غرف التخزين المبرده وذلك للاقلال من التغيرات الخارجيه التى تحدث فى ثمار المحصول اثناء تخزينه ، مثل النقص فى الوزن والحجم وسمك القشرة ويرجع ذلك الى فقد الماء بالتبخر . وتعتبر درجة حرارة التخزين من اهم العوامل التى تؤثر فى حدوث التغيرات الطبيعيه او الظاهريه فى المحصول اذ يوجد تناسب طردى بين سرعة تبخر الماء من المحصول وبين ارتفاع درجة حرارة التخزين ، فكلما زادت درجة حرارة التخزين كلما زاد تبخر الماء ، وبذلك يكون الفقد فى الوزن والحجم فى المحاصيل المخزنه عند درجة حرارة ٥ . ٤ ^{o}م اقل من المحاصيل المخزنه عند درجة حرارة ١٠ ^{o}م لذلك يستعمل فى المخازن المبرده الكبيره جهاز لقياس التغيرات التى تحدث فى الحرارة .

وعادة يلحق بهذه المخازن جهاز لقياس نسبة الرطوبه وتسجيلها اوتوماتيكيا ويسمى ثرموهيجروجراف Thermohygrograph. وتتناسب نسبة الرطوبه تناسبا عكسيا مع سرعة تبخر الماء من المحصول فكلما زادت نسبة الرطوبه كلما قل تبخر الماء والعكس صحيح . وبذلك يكون النقص فى الوزن والحجم اكثر فى المحاصيل المخزنه فى هواء نسبة الرطوبه به ٨٠٪ عنه فى هواء نسبة رطوبته ٩٠٪ ، وذلك لأن الفرق بين تركيز الماء فى المحصول المراد تخزينه وبين تركيز الماء فى هواء الغرفه يتسبب عنه انتشار الماء علي هيئة بخار Water Vapor Diffusion من داخل انسجة المحصول الى سطحه الخارجي ومنه الى هواء غرفة التبريد حتى يحدث تعادل بين تركيز بخار الماء فى هواء الغرفه والمحصول المراد تخزينه .

ويمكن التحكم فى نسبة الرطوبه اتوماتيكيا اثناء التبريد وذلك بالتحكم فى الفرق بين درجة حرارة المبرد ودرجة حرارة هواء غرفة التبريد . فكلما صغر هذا الفرق كلما زادت الرطوبه النسبيه ويرجع ذلك الى ارتفاع نقطة الندى فى هواء الغرفه . ويمكن رفع نسبة الرطوبه بسرعه فى غرف التبريد باحداث شابوره مائيه Fog وذلك بتسخين ماء داخل صهاريج توضع بالغرفه او دفع الماء داخل الغرفه على هيئة رذاذ بواسطة مراوح وتسمى مجموعه رشاشات الماء بالاجهزة المرطبه Humidistat للتحكم فى نسبة الرطوبه داخل غرف التبريد .

التجميد Freezing

وهو أحد العمليات التكنولوچيه التى تتم نتيجة لخفض درجات الحراره لمادة ما عن درجة حرارة تجمد هذه الماده . حيث أنه من المعلوم أن تخفيض درجة الحرارة يؤدى إلى تثبيط نشاط الكائنات الحيه الدقيقه فى المواد الغذائيه وتأخير التفاعلات الكميائيه والأنزيميه وبالتالى منع تدهور المنتجات الغذائيه وفسادها، مع إمكان حفظ المواد الغذائيه لفترات طويله تحت ظروف مجمدة بدون تغير فى خواصها الطبيعيه والكيمائيه.

عند تصميم نظام تجميد لمنتج غذائى فإنه يلزم تقدير أو حساب إحتياجات التبريد أو التغير فى الانثالبيا Enthalpy التى تحدث أثناء عملية التجميد. وكذلك أنه من الأهميه بمكان معرفة المعدل والزمن الذى يتم فيه تجميد مادة ما. وهو مرتبط بخواص المنتج وجودته حيث أن بمعدل التجميد سيتحدد معدل الإنتاج نتيجة له وبالتالى فإنه يتطلب التوازن بين التجميد السريع المرغوب ودرجة جودة المنتج.

وعامة فإن معظم الأغذيه سواء نباتيه أو حيوانيه تحتوى على نسبة عاليه من الرطوبه المذاب فيها كثير من المواد العضويه والغير عضوية. وتوجد هذه الرطوبه على شكل ماء حر Free Water له نفس الخواص الطبيعيه والكميائيه للخلايا والأنسجه فى المواد الغذائيه.

مما سبق فإنه يتضح أن الاعتبارات الهندسيه لاجراء عمليات التجميد تحتاج إلى تطبيق مبادىء الديناميكا الحراريه فى معاملات تجميد الأغذيه عن طريق خفض درجة حرارتها . وتورد فيما يلى تلخيص لذلك لأمكان اجراء الحسابات الخاصه بتجميد الأغذيه.

تطبيقات الديناميكا الحراريه :

يعتبر المحتوى الحرارى أو الانثالبيا Enthalpy عاملا هاما فى حسابات المعاملات الحراريه ويمثل ما يسمى بدالة الحالة State Function ويعبر عنها بالمعادلة الآتيه :-

$$H = U + PV \qquad (12\text{-}1)$$

حيث U تمثل الطاقه الداخليه للنظام ، P تمثل الضغط المطلق ، V تمثل حجم النظام .

ومن المعروف أن أى تغيير فى المحتوى الحرارى يكون نتيجة للتغير فى مايحتويه النظام من كمية حرارة عند ضغط ثابت وهو ما يطلق عليه بالحرارة النوعيه تحت ضغط ثابت "Specific heat at constant temperature "Cp أى أن:

$$\Delta H = Cp\ \Delta T \qquad (12\text{-}2)$$

وعند اضافة أو امتصاص طاقة حراريه لمادة ما فإن الانتقال الحرارى من أو إلى المادة يتسبب عنه قصور فى الطاقه وهو مايعبر عنه بالأنتروبيا Entropy.

$$\Delta S = \frac{\Delta q}{T} \qquad (12\text{-}3)$$

حيث Δq هى كمية الطاقه الحراريه المتبادله ، T درجة الحرارة المطلقه.

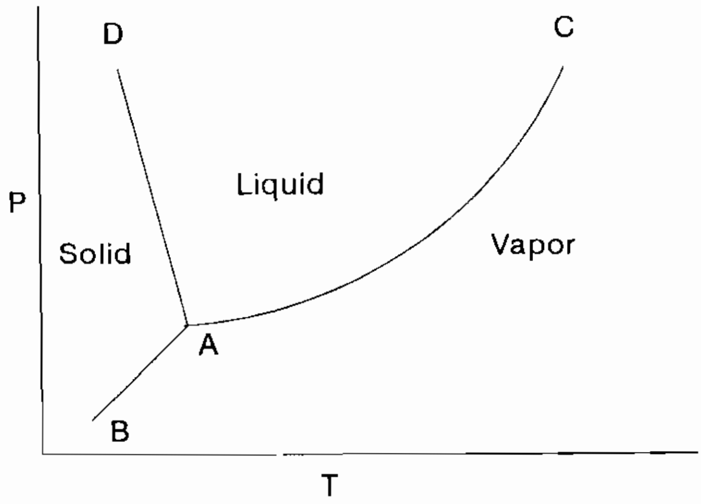
وعند ابقاء نظام ما على درجة حرارة ثابته وضغط ثابت كما هو الحال فى كثير من المنتجات الغذائيه المخزونه نتحصل على حالة من التوازن Equilibrium ينتج عنها مايسمى بالطاقه الحره Free Energy وتعرف بالمعادله الآتيه :-

$$G = H - TS \qquad (12\text{-}4)$$

أى أنها الفرق بين إنثالبيا المادة وحاصل ضرب درجة الحرارة المطلقه فى انتروبيا المادة . ويكون هذا التغير عند درجة حرارة ثابته مساويا إلى :

$$\Delta G = \Delta H - T\ \Delta S \qquad (12\text{-}5)$$

وفى كثير من عمليات تصنيع الأغذيه يحدث تغيير فى طور المادة Phase Change كما هى الحالة فى عمليات التبخير Evaporation والتجميد Freezing والانصهار والتسييح Thawing والتسامى Sublimation ويكون ذلك تحت ظروف درجة حرارة ثابته وضغط ثابت . ويكون نتيجة لذلك تغير فى النظام من حالة طاقه حرة مرتفعه إلى حالة طاقه حرة منخفضه وهو مايعرف بالكمون الديناميكى الحرارى Thermodynamic Potential ولدراسة ذلك نأخذ فى الاعتبار مادة نقية مثل الماء ويمثل تغير الطور المنحنى الآتى :



شكل (١٢-٦) منحنى تغير الطور

المنحنى AC يمثل حالة التوازن بين السائل والبخار Vaporization التبخير، والخط AD يمثل حالة الاتزان بين الصلب والسائل أى التجميد والتسييح Freezing & Thawing فى حين الخط AB يمثل حالة الاتزان بين الصلب والبخار Sublimation التسامى. والنقطة A هى النقطه الثلاثيه Triple point حيث يتواجد عندها السائل والصلب والبخار فى آن واحد عند نفس درجة الحرارة والضغط .

وأول من قام بدراسة حالة الاتزان الديناميكى الحرارى بين الأطوار المختلفه للمادة النقيه (الماء فى هذه الحالة) هما العالمان كلوسيوس وكلابيرون اللذان توصلا لمعادلة أطلق اسميهما عليها :-

Clausius- Clapeyron Equation:

$$\frac{dp}{dT} = \frac{\lambda}{T\Delta V} \qquad (12\text{-}6)$$

وعند افتراض أن بخار الماء له نفس سلوك الغاز المثالى ومع اهمال حجم السائل بالنسبه لحجم البخار فإن :

$$\frac{d(\ln p)}{dT} = \frac{\lambda}{RT^2} \qquad (12\text{-}7)$$

حيث:

R = الثابت العام للغازات

λ = الحرارة الكامنه للتبخير (تغير الطور Phase Change)

T = درجة الحراره المطلقه

P = ضغط بخار الماء الناتج

ΔV = التغير فى حجم البخار

إنخفاض نقطة التجمد Freezing Point Depression

فى الجزء السابق تكلمنا عن حالة الإتزان بين السائل وبخار السائل عند التبخير واعتبرنا أن بخار السائل يسلك سلوكا مثاليا مكننا من تطبيق قوانين الغاز المثالى والتى بنيت على إختفاء تام لقوى الجذب بين مكوناته . وكذلك الحال بالنسبه للسائل المثالى والذى يتميز بإنتظام تام لقوى الجذب بين جزيئاته . والقانون الأساسى الذى يصف سلوك أى سائل مثالى هو قانون راؤولت Raoult's Law والذى يعبر عنه :

$$P_A = X_A P_A^o \qquad (12\text{-}8)$$

حيث:

P_A = الضغط البخارى الجزئى للمكون A

P_A^o = الضغط البخارى للسائل النقى A عند نفس درجة الحرارة

X_A = الكسر الجزيئى للمكون A فى المحلول.

= mol Fraction of Component A in Solution

وعند التعامل فى معاملات تجميد محاليل غذائيه فإنه يتلاحظ إنخفاض نقطة تجميد الماء التى توجد به مذابات مختلفه إلى مستوى أقل من نقطة تجمد الماء النقى. ونجد أن مقدار هذا الأنخفاض فى نقطة التجمد يكون دالة مباشرة للوزن الجزيئى وتركيز المذاب فى المنتج الغذائى وفى المحلول مع الماء .

ويمكن كتابة معادلة كلوسيوس وكلابيرون بالنسبه للمكون A فى المحلول بإعتباره سائل مثالى ، كما يأتى (على نفس نمط الغاز المثالى):-

$$\frac{d(\ln X_A)}{dT_A} = \frac{\lambda'}{R\,T_A^2} \qquad (12\text{-}9)$$

حيث :

λ = الحرارة الكامنه للإنصهار (ك.جول/مول)

X_A = الكسر الجزيئى للماء فى المحلول

واذا اعتبرنا أن المحلول مخفف أى أن معظمه ماء نقى فإن المعادله السابقه يمكن التعامل معها رياضيا للحصول على المعادله الآتيه لحساب الانخفاض فى نقطة تجمد المحلول :

$$\Delta T = \frac{R\,T_{Ao}^{2}\,W_{A}\,m}{1000\ L} \qquad (12\text{-}10)$$

حيث:

T_{Ao} = نقطة تجمد السائل النقى A (الماء) درجة مطلقه

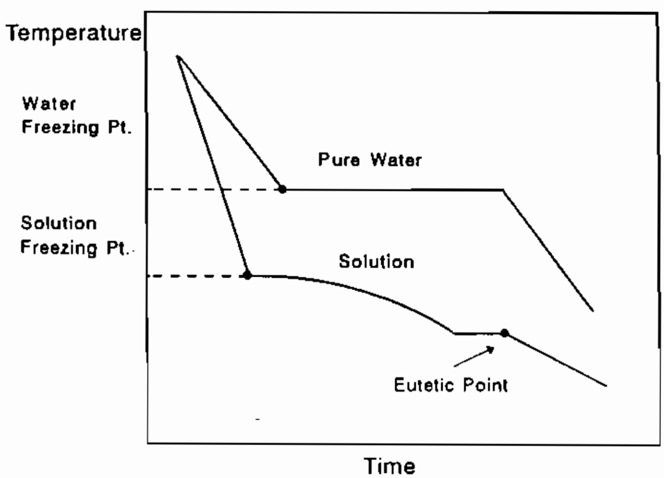
W_A = الوزن الجزيئى للمكون A

L = الحرارة الكامنه للإنصهار (ك.جول/كجم)

m = المولاليه مولات مذاب لكل كجم مذيب Molality.

تجميد المنتجات الغذائيه Freezing of Food Products

عملية التجميد الفعليه فى المنتجات الغذائيه تكون أكثر تعقيدا مقارنة بتجميد الماء النقى . والشكل (١٢-٧) يقارن بين منحنى تجميد ماء نقى مع محلول يحتوى على مذاب واحد . ويتلاحظ أنه في حالة الماء النقى كلما أزلنا كمية من الحرارة تنخفض درجة حرارة الماء حتى الوصول إلى نقطة التجمد واذا ما استمرت عملية إزالة الحرارة من النظام فإن ذلك يؤثر على تحول الطور من ماء فائق التبريد إلى ماء مجمد (ثلج) وذلك بإمتصاص الطاقه الكامنه للإنصهار فإذا ما تم التحول إلى الطور الصلب Solid Phase فإن درجة الحراره تنخفض عن نقطة التجمد نتيجة لهذا التبريد الفائق.



شكل (١٢-٧) إنخفاض نقطة تجمد المحاليل

أما فى حالة المحلول الذى يحتوى على مذاب واحد فإن إزالة الطاقه الحراريه يتسبب عنها انخفاض فى درجة الحرارة حتى نصل إلى درجة التجمد الابتدائيه للمحلول والتى نلاحظ أنها أقل من درجة الحرارة الابتدائيه للماء النقى ويمكن حساب هذا الانخفاض باستخدام المعادلة (١٢-٦) (معادلة كلوسيوس وكلابيرون). فاذا استمرت عملية إزالة الحرارة من المحلول تنخفض درجة الحرارة إلى أن تصل إلى مايسمى بنقطة التصلب Eutectic Point. ويفسر ذلك التحول بأن التجميد الابتدائى يؤدى إلى بلورة الثلج تحدث على خطوتين :

١- التنويه Nucleation أو البلورة
٢- نمو البلورة

والتنويه هى عملية الاثارة الأوليه لبدء التجميد وتتضمن تواجد أو تكوين نويات Nuclei تعتبر مراكز للتبلور تزداد فى حجمها مع زيادة معدل إزالة الطاقه الحراريه وبالتالي فإن معدل نمو البلورة يكون دالة لمعدل إحداث التجميد . وهذا المعدل يعتمد على :

أ- المعدل الذى تتفاعل عنده جزئيات الماء عند سطح البلوره.
ب- معدل إنتشار جزئيات الماء من المحلول الغير مجمد إلى سطح البلوره.
ج- المعدل الذى يتم عنده إزالة أو امتصاص الطاقه الحراريه .

ويجب ملاحظة فى نظام أى منتج غذائى فعلى يكون من المحتمل جدا تواجد أكثر من مذاب وبالتالى يمكن الوصول إلى أكثر من نقطة تصلب أثناء عملية التجميد .

ولحساب التغير الكلى في الانثالبى أو التغير في المحتوى الحرارى اللازم لتخفيض درجة حرارة المنتج الغذائى من مستوى معين فوق نقطة التجمد إلى درجة تخزين مرغوبه ، يمكن التعبير عنه بالمعادله التاليه :

$$\Delta H = \Delta H_s + \Delta H_u + \Delta H_L + \Delta H_I \qquad (12-11)$$

حيث:

ΔH = التغير الكلى فى الانثالبى
ΔH_S = كمية الحرارة المزاله من المواد الصلبه
ΔH_U = كميةالحراره المزالة من الماء الغير مجمد
ΔH_L = التغير فى الانثالبى نتيجة للحراره الكامنه للتجمد (الإنصهار)
ΔH_I = كمية الحرارة المزاله من الماء المجمد أو الثلج

وأى من كميات الحراره يمكن حسابها كما يأتى :

$$\Delta H = M.Cp. (T_I - T_F) + M.Cp. (T_F - T') \qquad (12-12)$$

حيث :

M = كتلة أو وزن المكون

Cp = الحراره النوعيه لهذا المكون

T_I = درجة الحراره الابتدائيه (قبل التجميد)

T_F = درجة حرارة التجميد

T' = درجة حرارة التخزين (بعد التجميد)

أما التغير فى الانثالبى نتيجة للحرارة الكامنه فيمكن حسابه من :

$$\Delta H_L = M.L \qquad (12-13)$$

حيث :

M = كتلة الماء المجمد

L = الحرارة الكامنه للتجمد

وعامة فإن كل من الكتلة والحرارة النوعيه للمكون بعد الوصول إلى نقطة التجمد تعتمد اعتماداً وثيقا مع درجة الحراره ، وبالتالى فإن حسابها يكون مقربا إذا أعتبرت أنها ثابته أو يمكن الحصول عليها من منحنيات خاصه بالمواد الغذائيه سواء الصلبه أو ذات الألياف من أصل نباتى أو حيوانى أو محاليل غذائيه (عصائر - ألبان) أو مخاليط نصف صلبه (أيس كريم والجرانيطه) حيث أن كل من الكثافه والحراره النوعيه تتغير تغيراً محسوسا بتغير درجة حرارة الماده .

حساب معدلات تجميد المنتجات الغذائيه Food Product's Freezing Rates

إن من أهم اقتصاديات عمليات تجميد الأغذيه هى معرفة معدل تجميد الغذاء وهو الذى سوف يتحدد به الزمن اللازم لاحداث التجميد الذى يؤثر مباشرة على جودة المنتج.

وهناك أكثر من تعريف لمعدل التجميد ولكن الأهم من التعريف هو طرق وصف معدل التجميد. وقد استقر الرأى على الطرق الأربعه الآتيه :

١- طريقة الزمن ودرجة الحراره

٢- سرعة واجهة الثلج Ice Front

٣- مظهر المنتج

٤- الطرق الحراريه Thermal Processes

وأكثرها ملائمه فى تصميم وتشغيل نُظم التجميد هو الزمن اللازم للوصول إلى درجة حرارة تجميد معينه عند أبطأ نقطه فى المنتج الغذائى. وأكثر العلاقات الرياضيه المباشرة تم إشتقاقها بواسطة العالم بلانك Plank لحساب زمن التجميد لعديد من أشكال المنتج الهندسيه والتى تتمثل فى شكل لوح رقيق Slab أو اسطوانه Cylinder أو كرة Sphere وكانت الصيغه الرياضيه العامه كما يأتى :

$$\theta_F = \frac{\rho L}{T_F - T_\infty}\left[\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{K}\right] \qquad (12\text{-}14)$$

حيث:

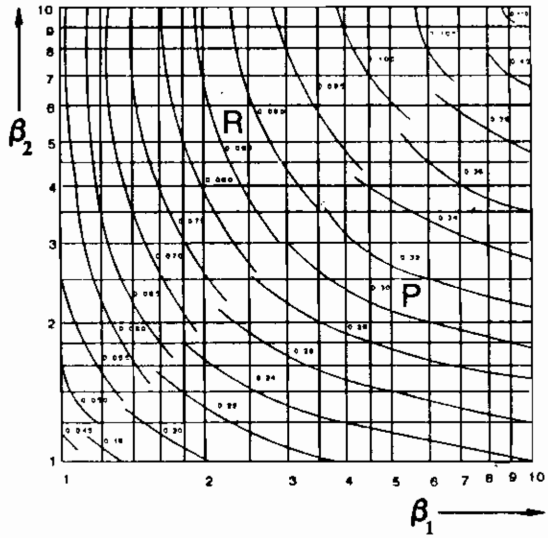
θ	=	الزمن اللازم للتجميد	hr
ρ	=	كثافة المادة الغذائيه المراد تجميدها	kg/m^3
L	=	الحرارة الكامنه للتجميد	kJ/kg
T_F	=	درجة حرارة التجميد	K
T_∞	=	درجة حرارة الجو المحيط بالمادة الغذائيه	K
h	=	معامل انتقال الحراره بالحمل للجو المحيط	$W/m^2\ K$
k	=	معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للمادة المجمده	W/m. K
a	=	سمك اللوح أو قطر الاسطوانه أو الكره	
P	=	ثابت	

= $\frac{١}{٢}$ للوح اللانهائى = $\frac{١}{٤}$ للاسطوانه اللانهائيه = $\frac{١}{٦}$ للكره

R = ثابت آخر

= $\frac{١}{٨}$ للوح اللانهائى = $\frac{١}{١٦}$ للاسطوانه اللانهائيه = $\frac{١}{٢٤}$ للكره

وفى حالة أى شكل هندسى آخر فيمكن الحصول علي كل من (P, R)من خريطة خاصه بمعادله بلانك حيث يتم الحصول على قيمة ثوابت أخرى هى β_1 ، β_2 حيث β_1 هى ثابت عند ضربة فى a يكون مساويا للبعد الأصغر الثانى لجسم ثلاثى الاتجاهات أو الأوجه Three Dimensions، وحاصل ضرب $a \times \beta_2$ يكون مساويا للبعد الأكبر للشكل الهندسى المذكور .



شكل (١٢-٨) خريطة ثوابت معادلة بلانك للتجميد

وهناك أكثر من طريقة لحساب زمن التجميد ولكن أبسطها هي العلاقه التى توصل إليها بلانك ولو أن هناك أكثر من تعديل لها للأخذ في الاعتبار المتغيرات الحقيقيه فى الطبيعه والتى لاتؤثر كثيرا في التقدير. وعلى ذلك فإنه يمكن الاعتماد على حساب زمن التجميد بطريقه بلانك والذى يقل على أكثر تقدير بنسبة تتراوح بين ١٠ - ١٥٪ عن النتائج المعمليه عند التطبيق .

وقد قام العالم ناجوكا Nagaoka بتعديل معادلة بلانك لتكون أكثر دقة في حساب زمن التجميد وتم تجربتها على الأسماك وأعطت نتائج مرضية. وتتميز هذه المعادلة بأنها أخذت فى الاعتبار كل من درجة الحراره الابتدائية والنهائيه في حين معادلة بلانك تعتمد على درجة حرارة التجمد ودرجة الحرارة المحيطة .

$$\theta_F = \left[1 + 0.0044\,(T_i - T_F)\right] \left[\frac{\rho\,\Delta H}{T_F - T_\infty}\left(\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k}\right)\right] \quad (12\text{-}15)$$

$$\Delta H = c_{pb}\,(T_i - T_F) + L + c_{pa}(T_F - T_s) \quad (12\text{-}16)$$

حيث :

θ_F =	الزمن اللازم للتجمد	hr
T_i =	درجة الحرارة الابتدائيه	K
T_F =	درجة حرارة التجمد	K
T_∞ =	درجة حرارة الجو المحيط	K
T_S =	درجة الحرارة النهائيه للمادة المجمدة	K
ΔH =	كمية الطاقة الحرارية المزاله من درجة الحرارة الابتدائيه إلى درجة الحرارة النهائيه لكل وحدة كتلة .	kJ/kg
ρ =	كثافة المادة المجمدة	kg/m^3
k =	معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للمادة المجمدة	W/m K
h =	معامل إنتقال الحرارة بالنقل على سطح المادة	W/m^2 K
c_{pb} =	الحرارة النوعيه للمادة الغير مجمدة (قبل التجميد)	kJ/kg K
c_{pa} =	الحرارة النوعيه للمادة مجمـــدة (بعـــد التجميد)	kJ/kg K
L =	الحراره الكامنه للتجمد .	kJ/kg
a =	سمك اللوح أو قطر الأسطوانه أو قطر الكرة	m

أنواع المجمدات Types of Freezers

هناك أكثر من تصميم لأجهزة تجميد وحفظ الأغذيه المجمده تعتمد اساساً على نوع المنتج المراد تجميده حيث يختلف من سائل أو عجائن أو منتجات نباتيه أو حيوانيه ويعتمد كذلك على طريقة التغليف إذا ماكانت فى كرتونات أو أكياس أو علب بلاستيك أو لدائن مرنه ومإلى ذلك من مواد تغليف مختلفه .

وتعتمد المجمدات كذلك علي طريقة احداث التجميد والذى يعتمد اساسا علي درجة الجوده ومدة عرض المنتج المجمد وما اذا كان المنتج مصنع أو نصف مصنع أو خام.

وعموما يمكن تصنيف المجمدات إلى ثلاثة نظم رئيسيه :

مجمدات دفع الهواء : Air Blast Freezers

ونظام التجميد فيها يعتمد على دفع هواء بارد بسرعة عاليه جدا على المنتج المراد تجميده والذى يمكن أن يكون ساكناأو متحركا داخل غرف التجميد حيث يتلامس هذا الهواء الفائق التبريد مع المنتجات ذات الكثافه العاليه والمغلفه فى عبوات كبيره توضع فى صوانى أو نظم نقل داخل حيز التجميد سواء كان النظام تجميد على دفعات أو التجميد المستمر. وتتحدد سعة النظام حسب حجم حيز التجميد وزمن التجميد اللازم للمنتج النهائي .

مجمدات الألواح Plate Freezers

حيث يتم احداث التجميد عن طريق التلامس المباشر للمنتجات المراد تجميدها سواء مغلفه أو غير مغلفه . وعادة يتم حفظ الالواح على درجة الحراره المرغوبه عن طريق تصميم مبخر نظام التبريد Evaporator ملامس مباشرة لمائع التبريد المستخدم. وعادة ماتصمم الالواح بحيث يمكنها الانضغاط إلى أسفل أو إلى أعلى على المنتج المراد تجميده لأحداث التجميد السريع المطلوب من تلامس مباشر مع جانبى الألواح وبذلك يتم زيادة معامل إنتقال الحراره السطحى بأكبر قدر ممكن .

ويتلاحظ هنا أن حركة الهواء داخل مجمدات الألواح غير مطلوبه حيث الاعتماد على امتصاص الحراره نتيجة للتلامس المباشر مع الألواح وبالتالى فإن مساحة الأرضيات تكون أقل من تلك الخاصه بمجمدات دفع الهواء وكذلك لاتحتاج إلى قدرات عاليه عند التشغيل . وتستخدم مجمدات الألواح بشكل كبير في تجميد منتجات الآيس

مجمدات الغمر Immersion Freezers

هذا النوع من المجمدات يستخدم التجميد الفائق Cryogenic Freezing حيث يتم وضع المنتج المراد تجميده فى حالة تلامس مباشر مع مائع التبريد عند درجة حرارة منخفضه .

وعادة فإن سائل النيتروچين هو أكثر سوائل التبريد انتشارا فى نظم التجميد بالغمر نظراً لأن نقطه الغليان لسائل النيتروچين تصل إلى - ١٩٦ ^{o}م وبذلك معدلات التجميد عاليه جداً خاصة إذا ماكان سريان سائل النيتروچين فى اتجاه معاكس لتحويل المنتج المراد تجميده .

ويلى ذلك سائل تبريد آخر وهو ثانى أكسيد الكربون السائل حيث أن له نقطة غليان تساوى - ٩٨ ^{o}م ويتم استخدامه بشكل مماثل لسائل النيتروچين وذلك بتزريره على المنتج مباشرة.

مثال (١) :

إحسب انخفاض نقطة التجمد لمحلول يحتوى على ١٠٪ كلوريد صوديوم عند الضغط الجوى العادى .

الحل

بما أن المحلول الذى يحتوى ١٠٪ كلوريد صوديوم يعتبر محلولا مخففا ، فإنه بالامكان استخدام المعادله الاتيه .

$$\Delta T_F = \frac{R\, T_{Ao}^2\; W_A . m}{1000\, L}$$

حيث ان:

ΔT_F	=	Freezing point depression of solution	K
R	=	Universal gas constant	
	=	8.314	kJ/kg.mol K
	=	1.99	kcal/kg.mol K
T_{Ao}	=	Absolute temperature of solvent	K
W_A	=	Molecular weight of solute (H_2O)= 18	kg./mol
m	=	Molaity	mol solute/kg.solvent
L	=	333.22	kJ/kg.
	=	79.9	kcal/kg.
	=	18 x 333.22	kJ/mol
	=	18 x 79.9	kcal/mol
W_B	=	Molecular weight of sodium chloride = 59	

∴ يمكن حساب المولاليه من المعادله الاتيه :

$$m = \frac{M_B \text{ (Per 1000g Solvent)}}{W_B \text{ (molecular wt. of NaCl)}}$$

$$m = \frac{100}{59} = 1.695$$

وبالتعويض في معادلة انخفاض نقطة تجمد المحلول نتيجة لاضافة كلوريد الصوديوم

$$\Delta T_F \;(\;K) = \frac{8.314\text{ kJ}}{\text{mol K}} . \frac{(273\text{ K})^2 .}{1000} \frac{18\text{ kg}}{\text{mol}} . \frac{1.695\text{mol}}{\text{kg}} \frac{1}{(333.22 \times 18)} \frac{\text{mol}}{\text{kJ}}$$

$$\Delta T_F = \frac{(8.314)\,(273)^2(1.695)}{(1000)\,(333.22)}$$

$$=3.15 \ K$$

ويمكن اجراء الحسابات بالوحدات المتريه كما يأتى :

$$\Delta T_F\ (K) = \frac{1.99\ kcal}{mol\ K} \cdot \frac{(273\ K)^2}{1000} \cdot \frac{18\ kg}{mol} \cdot \frac{1.695\ mol}{kg} \cdot \frac{1}{(79.9 \times 18)}\ \frac{mol}{kcal}$$

$$= \frac{(1.99)\,(273)^2(1.695)}{(1000)\,(79.9)}$$

$$= 3.15\ K$$

$$\therefore T_F = -3.15\ ^{o}C$$

مثال (٢) :

إخسب درجة الحرارة التى يبدأ عندها تكوين الثلج فى مخلوط آيس كريم مكوناته ١٠٪ دهن زبد ، ١٢٪ مواد صلبه غير دهنية ، ١٥٪ سكروز، ٦٣٪ ماء . اذا علمت بأن المذاب الذى يتم أخذه فى الإعتبار لخليط الآيس كريم هو السكروز ووزنه الجزيئى ٣٤٢ ، واللاكتوز ووزنه الجزيئى ٣٤٢ واللذين يمثلان ٥ر٥٤٪ من المواد الصلبه الغير دهنيه فى المخلوط .

الحـل

يتم حساب المولاليه كما يأتى:

Fraction Solute = كسر المذاب

$= 0.15 + (0.545)(0.12)$

$= 0.15 + 0.0654$

$= 0.2154$ g/g.product

وبدلالة كسر الماء (نسبة الي الماء)

$\frac{0.2154}{0.63} = 0.342$ g.Solute/g.Solvent (مذيب)

$= 342$ g.Solute/1000g.Solvent أو

$$\therefore m = \frac{M_B\ \text{(per 1000 g.Solvent)}}{W_B\ \text{(molecular wt.of Sucrose)}}$$

$$\therefore m = \frac{342}{342} = 1.0$$

وبالتعويض فى معادلة كلوسيوس وكلابيرون لحساب انخفاض نقطة تجمد المحلول نجد أن:

$$\Delta T_F = \frac{(8.314)\ (273)^2 (18)(1.0)}{(1000)(18\ \times\ 333.22)} = 1.86\ \ k$$

$$\therefore T_F = -1.86\ {}^{o}C$$

مثال (٣):

يتم تجميد ١٠٠٠ كجم من السمك (محتواه المائى ١ر٧٩٪) إلى درجة تجميد نهائية تساوى -١٠°م (حوالى ٨٥٪ من الماء متجمد). فإذا كانت الحرارة النوعيه للمواد الصلبه فى المنتج ٥ر١ ك جول/كجم.°م وللماء ١ر٤ ك.جول/كجم.°م وللثلج ٩ر١ ك.جول/كجم/°م. إحسب احتياجات التجميد للسمك من درجة حرارة إبتدائيه مقدارها ٥°م علما بأن الحرارة الكامنه للإنصهار للماء = ٢٢ر٣٣٣ ك.جول/كجم.

<u>الحل</u>

لكى نتخيل عملية التجميد تفصيلا نوضحها فى الرسم التخطيطى التالى :

درجة حرارة أكبر من درجة التجمد	مادة صلبه M_S	ماء غير مجمد M_U		$T > T_F$
درجة حرارة أقل من درجة التجمد	مادة صلبه M_S	ماء غير مجمد M_U	ثلج M_I	$T < T_F$
درجة حرارة أقل بكثير عن درجة النجمد	مادة صلبه M_S	ماء غير مجمد M_U	ثلج M_I	$T << T_F$

التغير الكلى فى الانثالبيا أو المحتوى الحرارى من مستوى معين فوق نقطة التجمد إلى درجة تخزين مرغوبه يمكن حسابها من المعادلة الاتيه :

$$\Delta H = \Delta H_S + \Delta H_U + \Delta H_L + \Delta H_I$$

فإذا كانت درجة الحرارة الابتدائيه قبل التجميد هى :

$$T_I = 5 \ ^oC$$

وكانت درجة الحرارة النهائية (التخزين) هى :

$$T = -10 \ ^oC$$

وحيث أن :

$$\Delta H = M c_p \ \Delta T$$

لكل من كمية الحرارة المزاله من المادة الصلبه S ، وللماء الغير مجمد U ، وللثلج (الماء المجمد) I.

وكانت كمية الحرارة الكامنه المحسوسه فى الانثالبيا هى :

$$H_L = M_I L$$

فتكون خطوات حساب احتياجات التجميد كما يأتى :

أ- كتلة المادة الصلبه

$$M_S = (1 - 0.791)\ (1000)$$

$$M_S = 209 \quad kg$$

ب- كتلة الماء الغير مجمد

$$M_U = (1 - 0.85)(0.791)\ (1000)$$

$$M_U = 118.65 \quad kg$$

ج- كتلة الماء المجمد (الثلج)

$$M_I = (0.85)(0.791)\ (1000)$$

$$M_I = 672.35 \quad kg$$

وبالتعويض فى المعادلات السابقه تكون :

كمية الحرارة المحسوسه المزاله من المواد الصلبه

$$\Delta H_S = (209)(1.5)\ (5 + 10)$$
$$\therefore\ \Delta H_S = 4702.5\ \ kJ.$$

كمية الحرارة المحسوسه المزالة من الماء الغير مجمد

$$\Delta H_U = (118.65)(4.1)\ (5 + 10)$$
$$\therefore\ \Delta H_U = 7297\ \ kJ.$$

كمية الحرارة المحسوسه المزالة من الماء المجمد (الثلج)

$$\Delta H_I = (672.35)(1.9)\ (0 + 10)$$
$$\therefore\ \Delta H_I = 12774.65\ \ kJ.$$

كمية الحرارة الكامنه

$$H_L = (672.35)(333.22)$$
$$H_L = 22040.46\ kJ.$$

∴ احتياجات التجميد الاجماليه :

$$\Delta H = 4702.5 + 7297 + 12774.65 + 224040.46$$
$$\therefore \Delta H = 248814.61\ \ kJ$$

ملحوظة :

أعتبرت درجة حرارة تجمد السمك الابتدائية تساوى صفر $^{\circ}$م حيث أنها لم تعطى فى المسأله .

مثال (٤):

لحم بقر خالى من الدهون على شكل قالب يتم تجميده فى مجمد يعمل بدفع الهواء Air Blast Freezer درجة حرارة الجو المحيط باللحم داخل المجمد يساوى -٣٠°م ، ومعامل انتقال الحرارة بالحمل يساوى ٣٠ وات/متر مربع كلفن ، ودرجة الحرارة الابتدائية للحم تساوى ٥°م ودرجة حرارة المنتج المجمد -١٠°م . فإذا كانت كتلة اللحم ابعادها ١ متر × ٢٥ر. متر × ٦ر. متر ، وكثافة اللحم ١٠٥٠ كجم/مترمكعب ، ومعامل التوصيل الحرارى للحم يساوى ١٠٨ر١ وات /متر.كلفن اعتبر أن نقطة التجميد الابتدائيه للحم - ٧٥ر١ °م والمحتوى المائى للحم المجمد ٥ر٧٤٪ وإحسب الزمن اللازم للوصول إلى درجة حرارة -١٠°م . قارن النتيجة إذا ما استخدمت معادلة ناجوكا فى حساب زمن التجميد علما بأن الحرارة النوعيه للحم قبل التجميد تساوى ٣ر١ وات/كجم كلفن والحرارة النوعيه للحم المجمد ٢ر١ وات/كجم كلفن.

<u>الحـل</u>

نستخدم معادلة بلانك معادلة (١٢-١٤) لحساب زمن التجميد .

$$\theta_F = \frac{\rho L}{T_F - T_\infty}\left[\frac{Pa}{h} + \frac{Ra^2}{k}\right]$$

ونحتاج لحساب قيمة كل من الثوابت R , P فى هذه المعادله إلى حساب قيمة β_1 , β_2 والخريطة الرابطة بين قيمهما وكل من ثوابت المعادله P , R كما يلى :

أ- ايجاد قيمة من β_1 , β_2

$$\beta_1 = \frac{0.6}{0.25} = 2.4$$

$$\beta_2 = \frac{1}{0.25} = 4$$

ونستخدم الخريطة التى نجد منها $P = 0.3$

ب- يتم عكس قيم كل من β_1 , β_2

$$\beta_1 = 4$$

$$\beta_2 = 2.4$$

ومن نفس الخريطة نجد أن $R = 0.085$

ج- يتم الحصول على قيمة الحرارة الكامنه للانصهار L طبقا للمحتوى المائى للمنتج

$$L = (333.22)\ (0.745) = 248.25\ \ kJ/kg.$$

$$\therefore \theta_F = \frac{\left(1050\ \frac{kg}{m^3}\right)\ \left(248.25\ \frac{kJ}{kg}\right)\ \left(1000\ \frac{J}{kJ}\right)}{\left(-1.75\ -\ (-30\ \ ^{o}C)\right)\left(3600\frac{sec.}{hr.}\right)}\ x$$

$$\left[\frac{(0.3)(0.25)}{\left(30\ \frac{W}{m^2\ \ K}\right)} + \frac{(0.085)\ \ (0.25)^2}{\left(1.108\ \frac{W}{m\ \ K}\right)}\right]$$

$$\therefore \theta_f = \left(2563.1\ \frac{J\ hr}{m^3\ ^{o}C}\right)\left(0.0025\ \frac{m^3 K}{W} + 0.0048\ \frac{m^3\ K}{W}\right)$$

$$\theta_F\ = 18.7\ \ \ hrs.$$

ملحوظة :

$$1\ \ Watt = 1\ \frac{Joule}{sec.}$$

د- يتم حساب كمية الطاقه الحراريه المزالة من درجة الحرارة الابتدائيه إلى درجة الحرارة النهائيه وذلك باستخدام المعادله الاتيه :

$$\Delta H = C_{pb}\ (T_i - T_F) + L + C_{pa}\ \ (T_F - T_S)$$
$$= \ (3.1)\ (5 + 1.75) + (2.1)\ (-1.75 + 10)$$
$$= \ 20.925 + 248.25 + 17.325$$
$$= 286.5\ \ \ \ kJ/kg$$

ويتم حساب زمن التجميد باستخدام معادلة ناجوكا (معادلة ١٢-٥)

$$\therefore \theta_f = \left[1 + 0.0044\ (T_i + T_F)\right]\left[\frac{\rho \Delta H}{T_F - T_\infty}\left(\frac{pa}{h} + \frac{Ra^2}{k}\right)\right]$$

$$= \left[1 + 0.0044\ (5 + 1.75)\right]\ \frac{(1050)(286.5)\ \ \ (1000)}{(-1.75\ +\ 30)\ \ (3600)}\ X\left[\frac{(0.3)(0.25)}{30} + \frac{(0.085)(0.25)}{1.108}\right]$$

$$\theta_f = (1.0297)\ \left[(2957.96)\ \ (0.0073)\right]$$

$= 21.6$ hrs.

Difference $= 21.6 - 18.7$

$= 2.9$ hrs

i.e about 15.5% higher than the time calculated based on Plank's Equation.

مسائل عامه

١- اذا كان المحتوى الرطوبى للقراصيا الطازجة ٧٠٪ ومحتواها الرطوبى بعد التجفيف ٧ر١٦٪ ، أوجد :

أ - نسبة الرطوبه للقراصيا قبل وبعد التجفيف.

ب- كمية الرطوبة الواجب طردها من ١٥كجم من القراصيا الطازجة .

ج - نسبة التجفيف .

٢- ماهى كمية الماء الذى يجب تبخيره من ١٠٠ كجم من الفاكهه الطازجة التى محتواها الرطوبى ٨٠٪ لكى يصل محتواها الرطوبى الى ٢٠٪ اوجد نسبة التجفيف ؟

٣- ماهو وزن الفاكهه الطازجة التى محتواها الرطوبى ٧٥٪ والتى يمكن منها انتاج ١٠٠ كجم من الفاكهه المجففه التى محتواها الرطوبى ٢٥٪ ؟ ماهى كمية الرطوبه المتبخرة ؟

٤- طن واحد (١٠٠٠ كجم) من نوع من الغلال محتواه الرطوبى ٢٥٪ يراد تجفيفه بحيث يصل محتواه الرطوبى الى ١٤٪ احسب :

١- كمية الرطوبه الواجب تبخيرها .

٢- وزن المادة بعد التجفيف .

٣- نسبة الرطوبة قبل وبعد التجفيف .

٤- نسبة التجفيف .

٥- طن واحد من نوع من الخضروات محتواه الرطوبى ٣٥٪ يراد تجفيفه بحيث يصل محتواه الرطوبى الى ١٠٪ . احسب :

١- كمية الرطوبه الواجب ازالتها بالتجفيف .

٢- وزن المادة بعد التجفيف .

٣- نسبة الرطوبه قبل وبعد عملية التجفيف .

٤- نسبة التجفيف .

٦- ١٨٢٠.٠ كجم من الذرة محتوها الرطوبي ٢٥٪ يلزم تجفيفها الى محتوى رطوبي مقداره ١٢٪ بواسطة مجفف يستخدم ٤٢٥ متر مكعب من الهواء في الدقيقه عند درجة حرارة جافه ٤٥°م فاذا كان الهواء الجوى عند درجة حرارة جافه ٢١°م ودرجة حرارة رطبة ١٨°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه ٣٢°م. احسب :

١- نسبة الرطوبه للذره قبل وبعد التجفيف.
٢- وزن المادة الجافه.
٣- وزن الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.
٥- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء .

٧- مجفف نفق يستخدم ٨٥ متر مكعب من الهواء في الدقيقه لتجفيف نوع من الخضروات من محتوى رطوبي ٤٠.٪ الى محتوى رطوبي ١٢٪ ومقدار ما ينتجه من الماده الجافه ١١٥ كجم في اليوم . اذا كانت المروحه المستخدمه في دفع الهواء تعمل عند ضغط مقداره ٠.٠٠٦٩ بار وكفاءتها ٧٥٪ وكثافة الهواء ١.٢ كجم/م^3 اوجد :

١- القدرة الحصانيه اللازمه لادارة المروحه .
٢- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف.
٣- وزن الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- نسبة التجفيف.

٨- مجفف صواني يستخدم ٣٤٠. متر مكعب من الهواء في الدقيقه عند درجة حرارة ٥٠.°م لتجفيف شرائح من البصل من محتوى رطوبي ٩٠.٪ الى محتوى رطوبي ٤٪ ومقدار ما ينتجه من البصل المجفف ٢٢٥كجم. فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه ٢٧°م ورطوبه نسبيه ٦٥٪ ويسخن الى ٥٠.°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه ٣٨°م احسب :

١- نسبة الرطوبه فى الماده قبل وبعد التجفيف.
٢- وزن البصب قبل عملية التجفيف .
٣- وزن الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوي.
٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.

٩- وحدة تجفيف بالرش تستخدم لتجفيف عصير البرتقال وتتكون من سيكلون التجفيف وضاغط ترددى للهواء وطلمبة طاردة مركزيه لدفع عصير البرتقال. والمطلوب تقدير القدرة الحصانيه لكل من الموتور اللازم لادارة الطلمبه والاخر اللازم لادارة الضاغط وذلك من المعلومات الآتيه :

وزن الهواء المراد ضغطه فى الدقيقه = ٢.٢٧ كجم فى الدقيقه
درجة حرارة الهواء عند دخوله اسطوانه الضاغط = ٢١°م
الضغط المطلق للهواء عند دخوله الضاغط = ١.٠٣٤ بار
الضغط المطلق للهواء داخل جهاز التجفيف = ٦.٢ بار
الضغط اللازم لتذرية عصير البرتقال عند الرشاش = ٩.٣ بار
كمية عصير البرتقال المطلوبه للتجفيف = ٤٥.٥ كجم فى الدقيقه
كثافة عصير البرتقال = ١٠٧٣.٢٤ كجم/متر مكعب
الكفاءة الميكانيكيه لكل من الضاغط والطلمبه = ٧٥٪

اعتبر ان الضاغط يتحرك داخل الاسطوانه اديباتيكيا تبعا للقانون $Pv^{1.4} = Const.$

١٠- مجفف صوانى يستخدم ٢٨٥ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه عند درجة حرارة ٣٨°م لتجفيف ٦٨٠ كجم من شرائح البطاطس من محتوى رطوبى ٨٥٪ الى محتوى رطوبى ٥٪ فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه ٢١°م ورطوبة نسبيه ٧٠٪ ويسخن الى ٤٣°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة حرارة جافه ٣٥°م احسب :
١- نسبة الرطوبه فى البطاطس قبل وبعد التجفيف.
٢- وزن البطاطس المجفف.
٣- وزن الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء الجوى.
٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف.

١١- مجفف صوانى يستخدم ٢٤٠ متر مكعب من الهواء فى الدقيقه لتجفيف طن واحد من شرائح البصل من محتوى رطوبى ٩٠٪ الى محتوى رطوبى ٥٪ فاذا كان الهواء الجوى يدخل المجفف عند درجة حرارة جافه ١٨°م ورطوبه نسبيه ٨٠٪ ويسخن بحيث تكون درجة حرارة البصل ثابته اثناء التجفيف عند درجة حرارة ٢٤°م ويخرج الهواء من المجفف عند درجة ٣٠°م احسب :

١- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف .
٢- وزن شرائح البصل المجفف.
٣- وزن الرطوبه الواجب ازالتها.
٤- كمية الحراره الواجب اضافتها للهواء الجرى .
٥- الوقت اللازم لاتمام عملية التجفيف .

١٢- يراد تجفيف حبوب بمعدل ٩٠٨٠ كجم يوميا من محتوى رطوبى ٤٠٪ الى محتوى رطوبى ١٠٪ فاذا كانت الرطوبه المطلقه للهواء الداخل الى المجفف ٠.٠٠٧ كجم رطوبه /كجم هواء جاف وللهواء الخارج من المجفف ٠.٠١٦ كجم رطوبه/كجم هواء جاف وكانت كثافة الهواء ١.٢٨ كجم/متر مكعب . احسب:

١- القدره الميكانيكيه اللازمه لدفع الهواء داخل الحبوب اذا كان الضغط المقابل يعادل ٥سم ماء وكفاءة الموتور المستخدم ٧٥٪.
٢- الطاقه الكهربيه بالكيلووات ساعه اللازمه لتسخين الهواء من درجة حرارة ٢٤°م الى ٨٠°م.

١٣- مجفف نفق يستخدم لتجفيف بلح من محتوى رطوبى ٦٠٪ الى ٢٠٪ سعته ٢٥ عربة بكل منها ١٢ صنيه حمولة كل منها ١١.٥ كجم بلح وتستغرق عملية التجفيف ٤ ساعات فاذا كان الهواء يدخل الى مسخن المجفف عند ٢٦°م ، ٧٠٪ رطوبه نسبيه ويتم تسخينه الى ٦٠°م ويخرج الهواء من المجفف عند ٤٣°م . احسب:

١- نسبة الرطوبه قبل وبعد التجفيف.
٢- كمية الرطوبه الواجب ازالتها فى الساعه.
٣- نسبة التجفيف.
٤- كمية الحرارة الواجب اضافتها للهواء معبراً عنها بالحصان البخارى.
٥- قدرة المروحه اللازمه لدفع الهواء اذا كان ضغط تشغيلها ٠.٠٠٦٩ بار وكفاءتها ٧٥٪.

١٤- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمه لتبريد ٤٥٠٠ كجم من اللبن بعد بسترته على درجة حراره ٦٥°م الى درجة حرارة ١٥°م اذا علمت ان نسبـة الدهن والمواد الصلبه الاخرى باللبن ٥ر١٢٪ وان عملية التبريد تستغرق ٦ ساعات مع استخدام الماء فى التبريد الاولى حتى تصل درجة حرارة اللبن الى ٥٠°م علما بان كفاءة وحدة التبريد بمشتملاتها ٩٠٪ .

١٥- اذا كانت عملية فصل الاحماض الدهنيه من زيت بذرة القطن تستلزم تبريد الزيت الى -١٥°م وتستغرق هذه العمليه ثلاث ساعات . احسب سعة وحدة التبريد اللازمه لمصنع يقوم بانتاج ٢٨٠٠ كجم من الزيت يوميا اذا علمت ان الحرارة النوعيه للزيت ٧ر٠ ودرجة حرارته قبل عملية التبريد ٤٠°م وكفاءة وحدة التبريد ٧٠٪ .

١٦- غرفة تبريد تستخدم وسيط مبرد من مخلوط من الماء والملح فاذا كانت درجة حرارة المخلوط الملحى عند دخول الغرفه -١٠°م ودرجة حرارته بعد مروره بالغرفه -٧°م وحرارته النوعيه ٨ر٠ ، ومقدار سريانه ٥٥٠ كجم/ساعه فما هى سعة وحدة التبريد فى اليوم علما بان كفاءة وحدة التبريد الكليه ٨٠٪ .

١٧- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمه لامداد مصنع اغذية بمياه الشرب المثلجه اللازمه لعماله اذا علمت ان عدد العمال ٧٤٠ عاملا ، والكميه المقدرة لشرب العامل يوميا حوالى لتر ماء مثلج ودرجة حرارة الماء بعد تبريده ١٠°م ومتوسط درجة حرارة المنطقه ٤٤°م وكفاءة وحدة التبريد ٨٥٪.

١٨- ماهى سعة وحدة التبريد اللازمه لمعمل يقوم بفصل الشمع من غشيم القصب اذا كانت الكمية المبرده يوميا من خليط الشمع والزيت ٥ر٢٣كجم وتبرد من درجة ٥٠°م إلى ٥°م وحرارتها النوعيه ٨٥ر٠ وعدد ساعات التبريد ٥ساعات .

١٩- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقة التبريد بالضغط تستخدم لحفظ ٦٧٠ كجم من اللحوم عند درجة حرارة -٦°م لمدة ساعه واحدة . احسب الشغل اللازم لادارة الضاغط اذا علمت ان عدد لفاته ١٠٠ لفه/دقيقه وان سعة وحدة التبريد ١٥ حصان ميكانيكى لكل طن تبريد فى الساعه وان اللحم يدخل الثلاجة عند درجة حرارة ١٠°م. اعتبر ان الحرارة النوعيه للحم تساوى ٧ر٠ .

٢٠- ماهى سعة وحدة التبريد بوحدات طن تبريد/يوم اللازمه لحفظ درجة حرارة ثلاجة للبرتقال ثابته على ٥°م بينما الجو الخارجى الملامس للثلاجة فى درجة حرارة ٣٠°م اذا علمت ان جوانب الثلاجه وسقفها مصنوع من الخشب بسمك ٢.٥سم والمساحه السطحيه للثلاجه ٧٥ر٤ متر مربع ومعزوله بقوالب صوف زجاجى مضغوط بسمك ٣سم وكفاءة وحدة التبريد ٨٠٪ علما بان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب = ٤٥ر. وللصوف الزجاجى = ٠١ر. كيلوكالورى/ساعه.متر°م ومعامل انتقال الحراره بالنقل للهواء الخارجى الملامس للثلاجة = ٣ كيلوكالورى/ساعه متر٢.°م وللهواء الداخل = ٥ر١ كيلوكالورى/ساعه متر٢.°م .

٢١- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقة التبريد الصناعى بالضغط تستخدم لحفظ ٦٧٠ كجم من اللحوم عند درجة حرارة -٦°م لمدة ٨ ساعات ، ويدخل اللحم الثلاجة عند درجة حرارة ١٠°م وحرارته النوعيه ٧ر. كيلوكالورى/كجم °م اذا كانت المساحه السطحيه لجدار الثلاجه ٤٠ مترمربع والجدران مكونه من خشب بسمك ٥سم ومعزوله بقوالب صوف زجاجى مضغوط بسمك ٣سم ودرجة حرارة الجو الخارجى الملامس لجدران الثلاجه ٢٠°م . احسب سعة وحدة التبريد الكلية بالطن تبريد فى اليوم اللازمه علما بأن :

معامل انتقال الحرارة بالنقل للجو الخارجى=٠٥ر٢ كيلوكالورى/ساعه متر٢.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجى =٠١ر كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب =٢٥ر. كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة لجو الثلاجة الداخلى =٠٥ر١ كيلوكالورى/ساعه متر٢.°م
كفاءة وحدة التبريد = ٨٠٪

٢٢- ثلاجة عرض تعمل بطريقة التبريد الصناعى بالضغط تستخدم لحفظ مواد غذائيه مقدارها ١٠٠٠ كجم يوميا عند درجة حرارة ٥°م . تدخل المواد الغذائيه الثلاجة عند درجة ٢٠°م والحرارة النوعيه المتوسطه لهذه المواد ٦٢ر. كيلوكالورى/كجم °م . اذا كانت جدران الثلاجه مكونه من خشب بسمك ٥سم

ومعزوله بقوالب صوف زجاجي بسمك ٥ر٢سم ومساحتها السطحيه ١٥ مترمربع . اما واجهة الثلاجة فمكونه من طبقتين من الزجاج كل منها بسمك ٢٥ر١سم تحصر بينهما طبقة من الهواء بسمك ٥ر٧ سم ومساحتها السطحيه ٥ متر مربع . احسب سعة وحدة التبريد اللازمه بالطن تبريد فى اليوم علما بان :-

درجة حرارة الجو الخارجي الملامس لجدران وواجهة الثلاجة = ٢٠°م

معامل انتقال الحرارة بالنقل للجو الخارجي= ٥ر٢ كيلوكالورى/ساعه متر^{٢}.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجي =٠١ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للزجاج =٢ ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م

معامل انتقال الحرارة بالنقل لجو الثلاجه الداخلى =٥ر١ كيلوكالورى/ساعه متر^{٢}.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقة الهواء =٢ ٠ر كيلوكالورى/ساعه متر.°م
المحصوره بين زجاج واجهة الثلاجه

كفاءة وحدة التبريد = ٨٠٪

٢٣- ثلاجة تجارية تعمل بطريقة التبريد الصناعى بالضغط تستخدم لحفظ ١٠٠٠ كجم من التفاح عند درجة حرارة ٥°م لمدة عشر ساعات ويدخل التفاح الثلاجة عند درجة حرارة ١٥°م وحرارته النوعيه ٩ر٠ كيلوكالورى/كجم °م . فاذا كانت المساحه السطحيه لجدران الثلاجه الجانبيه ٣٠ مترمربع مكونه من طوب احمر بسمك ٥ر٧سم ومغطاه بطبقه من الاسمنت بسمك ٢٥ر١ سم ومعزوله من الداخل بطبقه من قوالب الصوف الزجاجي المضغوط بسمك ٢٥ر١سم والمساحه السطحيه لسقف وارضية الثلاجة ١٥ متر مربع ومكونه من طوب احمر بسمك ٥ر٧ سم ومغطاه بطبقه من اسفلت الاسطح كمادة عازله بسمك ٢٥ر١سم وكانت درجة حرارة الجو الخارجي الملامس لجدران واسقف وارضية الثلاجة ١٥°م وكمية الحرارة المتولدة عن تنفس التفاح ٢٠٥ كيلوكالورى لكل طن من التفاح فى اليوم ، احسب سعة وحدة التبريد الكليه بالطن تبريد فى اليوم اللازمه لحفظ درجة حرارة التفاح علما بان :

معامل انتقال الحرارة بالحمل للجو الخارجي= ٥ر٢ كيلوكالورى/ساعه متر^{٢}.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للطوب الاحمر =٠١ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لطبقة الاسمنت =٢٥ ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م

معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للصوف الزجاجي =١٠ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل لاسفلت السطــح =٣٥ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر.°م
معامل انتقال الحرارة بالحمل لجر الثلاجه الداخلى=٥ر١ كيلو كالورى/ساعه متر². °م
كفاءة وحدة التبريد = ٨٥٪

٢٤- ماهى سعة وحدة التبريد بوحدات طن تبريد فى اليوم اللازمه لحفظ درجة حرارة ثلاجة للبرتقال ثابته على ٥°م بينما الجو الخارجي للثلاجه فى درجة حرارة ١٥°م اذا علمت ان جوانب الثلاجه وسقفها مصنوع من الخشب بسمك ٥ر٢سم والمساحه السطحيه للثلاجة ١٥ مترمربع ومعزوله بقوالب صوف زجاجي مضغوط بسمك ٤سم وكفاءة وحدة التبريد ٨٠٪ علما بان معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب : ٥ر وللصوف الزجاجى = ١٠ر٠ كيلوكالورى/ساعه متر°م .. ومعامل انتقال الحرارة بالنقل للهواء الملامس لجدران الثلاجه من الخارج = ٥ر٢ كيلوكالورى/ساعه متر² °م ، ومعامل انتقال الحرارة بالنقل لجو الثلاجة الداخلى = ٥ر١ كيلوكالورى/ساعه متر² °م .

٢٥- ثلاجة تبريد للمواد الغذائيه تتحمل حمل تبريدى قدرة ١٢ طن تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر هى ٣٠°م ، -١٠°م على الترتيب . فاذا كان الضاغط المستخدم ذو اسطوانتين فردى التأثير ويدور بسرعة ٢٠٠ لفه/الدقيقه كما ان مقدار الارتفاع فى درجة حرارة ماء التبريد بالمكثف يساوى ٥°م . اذا كان مائع التبريد المستخدم ١ - فريون ١٢ ٢- ركلين ١٣٤أ أحسب:

أ - سعة وحدة التبريد.
ب- كمية الحرارة المفقوده فى المكثف.
جـ- معامل الاداء للثلاجة.
د - وزن مائع التشغيل اللازم .
هـ- القدرة المطلوبه للضاغط .
و - ابعاد اسطوانة الضاغط اذا كان قطر الاسطوانه يساوى طول المشوار.
ز - كمية ماء التبريد اللازم لتبريد السائل بالمكثف

٢٦- ثلاجة تبريد تتحمل حمل قدرة ٢٠ طن تبريد ودرجة حرارة المبخر والمكثف ٣٥°م ، -١٢°م على الترتيب فاذا كان الضاغط ذو (٦) اسطوانات ويدور بسرعة ١٥٠٠ لفه/الدقيقه مزدوج التأثير . أحسب :

أولا : للأمونيا ثانيا : للفريون ١٢

أ - سعة التبريد.
ب- كمية الحرارة المفقوده فى المكثف.
جـ- معامل الجودة للثلاجة.
د - كمية مائع التشغيل اللازم .
هـ- القدرة المطلوبه للضاغط .
و - ابعاد اسطوانة الضاغط اذا كانت نسبة طول المشوار الى قطر الاسطوانه = ٢ر١.
ز - كمية ماء التبريد اللازم لتبريد مائع التشغيل بالمكثف اذا كان ارتفاع درجة حرارة مائع التبريد بالمكثف تساوى ٥°م .

٢٧- ثلاجة تبريد تعمل مره بالفريون ١٢ ومرة أخرى بركلين ١٣٤أ كمائع تشغيل بالتبريد و درجة حرارة مكثفها ٣٥°م ودرجة حرارة مبخرها -١٠°م علما بان الضاغط يقوم بضغط الفريون ايزنتروبى من ضغط المبخر الى ضغط المكثف أوجد معامل الجودة للثلاجة فى الحالات الآتيه :

١- بدون استخدام مبادل حرارى .
٢- باستخدام مبادل حرارى لتبريد مائع التبريد المشبع من درجة صفر °م الى درجة -٦°م.

٢٨- ثلاجة تبريد تعمل تحت حمل تبريدى قدرة ١٠ طن تبريد عند درجة حرارة -١٠°م وضاغط يعمل شغل قدرة ٥٠ كيلوكالورى/كجم وذو اسطوانتين وعدد لفاته ١٥٠٠ لفه/الدقيقه فردى التأثير وبمبادل حرارى لتبريد السائل المشبع المكثف الخارج من المكثف بواسطة مياه ومقدار ارتفاع درجات حرارة المبادل ١٠°م. احسب :

١- معدل سريان مائع التبريد فى الدقيقه فى حالة استخدام النوشادر ، وحالة استخدام ركلين ١٣٤أ .
٢- قدرة الضاغط بالحصان الميكانيكى .
٣- كمية ماء التبريد/الدقيقه .

٢٩- ثلاجة تجاريه تعمل بطريقة التبريد الصناعي بالضغط لمائع تبريد ، تستخدم لحفظ ٥٠٠ كجم من اللحوم المجمده عند درجة -١٠°م - ويدخل اللحم الثلاجة عند درجة حرارة ٢٥°م ليتم تجميده في ٨ ساعات علما بان درجة تجميد اللحم هي -٢°م والحرارة النوعيه قبل التجمد ٧٧ر. والحرارة النوعيه بعد التجميد هي ٤ر. كيلوكالوري/كجم °م . والحراره الكامنه لانصهار اللحم هي ٥٦ كيلوكالوري لكل كجم اذا كانت المساحه السطحيه لجدار الثلاجة ٣٩ متر مربع والجدران مكونه من خشب بسمك ٤سم وصوف زجاجي بسمك ٢سم ودرجة حرارة الجو الخارجي الملامس لجدران الثلاجة ٣٠°م وان معامل انتقال الحرارة للمواد هي :-

معامل انتقال الحرارة بالحمل للجو الخارجي= ٧ر٨ كيلوكالوري/ساعه متر٢ . °م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للزجاج =٣٧ر. كيلوكالوري/ساعه متر. °م
معامل انتقال الحرارة بالتوصيل للخشب =١٤٩ر. كيلوكالوري/ساعه متر. °م
معامل انتقال الحرارة بالحمل لجو الثلاجه الداخلي =٩ر٤ كيلو كالوري/ساعه متر٢ . °م

احسب مايأتي لكل من مائع تبريد أ - فريون ١٢ ، ب- ركلين ١٣٤أ

١- الحمل الحراري مقدرا بالطن تبريد مع اعتبار ٢٥٪ احتياطي خدمه .
٢- القدره اللازمه وكذا قطر اسطوانة الضاغط الذي عدد لفاته ١٥٠٠ لفه/دقيقه مزدوج التأثير.
٣- كمية ماء التبريد في المكثف علما بان مقدار الارتفاع في درجة الحرارة ١٠°م.

٣٠- ثلاجة تبريد للمواد الغذائيه تعمل بالضغط لمائع تبريد من ضغط المبخر (٥ر١ جوى) الى ضغط المكثف (٩ جوى) ويخرج الغازمن الضاغط بدرجة حرارة ٨٠°م ليدخل المكثف ويبرد بواسطة ٥ر٧ كجم/دقيقه . وترتفع درجة حرارة ماء التبريد بمقدار ١٠°م .

أ - وقع الدوره على خريطة مائع التبريد اذا كان المائع فريون ١٢ او ركلين ١٣٤أ .
ب- أرسم الدورة موضحا جميع اجزائهـــا .
ج- احسب حمل التبريد للثلاجة في كلا الحالتين.

٣١- ثلاجة تبريد للحوم تعمل مره على مائع التبريد فريون ١٢ ومره أخرى على مائع التبريد ركلين ١٣٤أ ذات حمل تبريدى مقداره ٢٥ طن تبريد ودرجة حرارة المكثف والمبخر ٣٠°م ، -١٠°م على الترتيب بحيث تكون انتروبيا الغاز بعد الضغط ١٦ر١ كيلوكالورى/كجم°م فى حالة الفريون ١٢ ، ٨ر١ كيلوجول /كيلو جرام كلفن .

احسب :

١- سعة التبريد .
٢- كمية الحرارة المفقوده بالمكثف في كلا الحالتين.
٣- معامل اداء الثلاجه .
٤- معدل سريان مائع التبريد .
٥- القدرة المطلوبه لتشغيل الضاغط فى كلا الحالتين.
٦- معدل سريان ماء التبريد بالمكثف اذا كان Δ د = ٨°م

٣٢- ثلاجة تبريد تعمل على مائع تبريد الفريون ١٢ ومره اخرى مائع التبريد ركلين ١٣٤ أ ويتم تشغيلها يوميا لمدة ٨ ساعات لتبريد ٥ طن خضروات من درجة حرارة الحقل (٣٠°م) الى درجة حرارة الحفظ (-١٠°م) فاذا اعتبرت البيانات الآتيه :

- الحرارة النوعيه للخضروات = ٧ر٠ كيلوكالورى/كجم°م
- معامل انتقال الحرارة بالحمل للهواء الخارجى والداخلى للثلاجه = ٦ ، ٢ كيلوكالورى/ساعه .متر٢ . °م.
- ابعاد الثلاجة ٥ × ٦ × ٦ متر
- حرارة التنفس للخضروات = ٧٠٠ كيلوكالورى/طن.يوم.

احسب مايأتى :-

١- الحمل التبريدى للثلاجة مع اعتبار كمية حرارة الخدمه والطوارىء = ٢٥٪.
٢- معدل سريان مائع التبريد بالكيلوجرام/دقيقه .
٣- القدرة الميكانيكيه اللازمه لادارة الضاغط .
٤- هل يمكن استخدام ضاغط ذو اسطونتين قطر وطول اسطوانتة ١٠ ، ١٢ سم بالترتيب ويدور بسرعة ١٥٠٠ لفه/دقيقه ؟

٣٣- إحسب زمن التجمد اللازم لقطعة ستيك من اللحم البقرى على هيئة لوح رقيق سمكه ٢٥.ر. متر ويمكن اعتبار طوله لانهائى. وضعت قطعة اللحم فى مجمد يعمل بتيار الهواء البارد المدفوع درجة حرارته -٣٠°م ومعامل إنتقال الحرارة بالحمل يساوى ٢٠ وات/متر مربع.كلفن . اذا علمت أن :

كثافة اللحم المجمد	١٠٥٠	كجم/متر مكعب
الحرارة الكامنه لانصهار الثلج	٢٢ر٣٣٣	ك.جول/كجم
المحتوى المائى للجم	٦٥٪	
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل للحم	٣٥ر١	وات/متر .كلفن
الحراره النوعيه للماء الغير مجمد	٥٠ر٣	ك.جول/كجم .°م
الحرارة النوعيه للثلج	٧٥ر١	ك.جول/كجم .°م
الحراره النوعيه للمادة الصلبه	٥٠ر١	ك.جول/كجم .°م

ماذا تكون إحتياجات التجميد اذا كانت درجة الحرارة الابتدائيه ٢٠°م ودرجة حرارة تجمد قطعة اللحم - ٧٥ر٢°م ؟

٣٤- نفق للتجميد الفورى السريع (Instant Quick Freezing IQF) يستخدم لتجميد الفراوله طول السير الناقل ٦ متر. ويستخدم دفع الهواء البارد كوسط للتجميد درجة حرارته -٣٤°م ويتحرك الهواء البارد خلال مرقد المنتج ينتج عنه معامل إنتقال الحرارة السطحى ٨٥ وات/مترمربع كلفن. وتدخل الفراوله النفق عند درجة حرارة ٥°م ويتعين تجميدها إلى -٢٠°م ، إذا علمت أن :-

كثافة حبات الفراوله	٩٦٠	كجم/مترمكعب
معامل إنتقال الحرارة بالتوصيل	٨٠ر٢	وات/متر.كلفن

باعتبار أنه يمكن تقريب شكل حبة الفراوله على أنها كرة قطرها ١٣٠ر. متر ، إحسب زمن التجميد وسرعة الناقل اللازمه لذلك .

٣٥- إحسب نقطة تجمد لبن خالى الدهن (Skim milk) علما بان مكوناته هى : ٥ر١٪ لاكتوز ، ٦ر٣٪ بروتين ، ٨ر٠٪ دهن ، ٣ر٠٪ مواد معدنيه ورماد ، ٢ر٩٠٪ ماء مع اعتبار أن وجود اللاكتوز سيكون له الأثر الغالب على نقطة التجمد . (الوزن الجزيئى للاكتوز ٣٤٢).

٣٦- إذا كانت نقطة تجمد عصير العنب تساوى -٨ر١ °م ومحتواه المائى عند هذه الدرجه ٧ر٨٤٪ إحسب الوزن الجزيئى الفعال لعصير العنب .

٣٧- تم تعبئة عصير الفراوله فى عبوة مقاسها (٠٤ر٠ متر × ١ر٠ متر × ١٤ر٠ متر)

وتدخل العبوات مجمد ألواح درجة حرارة الجو المحيط بها -٣٠°م ومعامل انتقال الحراره السطحى يساوى ٢٥ وات/مترمربع كلفن وتدخل العبوه إلى المجمد عند درجة حرارة ٥°م فإذا علمت أن المحتوى المائى للفراوله ٤ر٨٣٪ ومعامل انتقال الحرارة بالتوصيل المكافىء (مادة العبوة وعصير الفراوله) يفترض أنه ٢ وات/متر.كلفن وكثافة الفراوله ٩٦٠ كجم/مترمكعب. مستخدما خرائط التجميد إحسب الزمن اللازم لتجميد عصير الفراوله .

٣٨- إحسب الزمن اللازم لتجميد قطعة من اللحم على شكل لوح رقيق سمكة ٥سم وكانت ظروف التشغيل كما يأتى :

درجة الحرارة الابتدائية للحم	=	٥°م
درجة حرارة تجميد اللحم	=	-٥°م
درجة حرارة اللحم المجمد النهائى	=	-٢٥°م
درجة حرارة الجو المحيط باللحم	=	-٣٠°م
الحراره النوعيه للحم قبل التجميد	=	٤ر٠ ك.كالورى/كجم °م
الحراره النوعيه للحم بعد التجميد	=	٩ر٠ك.كالورى/كجم °م
كثافة اللحم	=	١٠٥٠ كجم/مترمكعب
الحرارة الكامنه للتجميد	=	٨٠ ك.كالورى/كجم
معامل انتقال الحراره بالتوصيل للحم	=	٤٥ر١ ك.كالورى/ساعه.متر °م
معامل انتقال الحراره بالنقل للسطح	=	١٨٠ ك.كالورى/ساعه.مترمربع. °م

قارن الزمن باستخدام طريقة بلانك مع طريقة ناجوكا .

References المراجـــع

اولا : المراجع الاجنبيه :

- ASHRAE Guide and Date Book (1988), Applications American Society of Heating, Refrigerating, and Air Conditioning Engineers.

- Batty,J. Clair, and Steven L. Folkman, (1984), Food Engineering Fundamentals, John Wiley and sons, Inc.

- Brennan, J.G., Butters, J.R., Cowell, N.D., and Lilly, A.E.V. (1990) Food Engineering Operations, 3rd ed. Elsevier Science Publishing Co., New York.

- Carslaw H.S., J.C. Jaeger. (1959), Conduction of Heat in Solids. Second edition. Oxford at the Clarendon Press.

- Charm, Stanley E., (1978), Fundamentals of Food Engineering, AVI Publishing Co., Westport, Connecticut.

- Cruess. W.V. (1958), Commeraial Fruit and Vegetable Products. Fourth edition. McGraw-Hill Book Company, INC. New York Toronto London.

- Daniels, Farrington, Robert A. Alberty. (1957). Physical Chemistry. Fourth edition. John Wiley & Sons. Inc. New York, London.

- Desrosier, N.W., J.N. Desrosier. (1977), The Technology of Food Preservation. Fourth edition. AVI Publishing Company, INC. Westport, Connecticut.

- Doolittler Jesse S. (1964). Thermodynamics for Engineers. Second edition. International Text-book Company Scranton, Pennsylvania.

- Eckert, E.R.G. , Robert M. Drake, Jr. (1959) Heat and Mass Transfer. Second edition. McGraw-Hill Book Company, INC. New York, Toronto.

- El-Sahrigi, Ahmed F., (1981), Thermodynamic Properties of Steam, and Tranient Heat Transfer Charts. Faculty of Agriculture, Ain Shams University.

- Farrall Arthur W. (1976), Food Engineering Systems, Vol. I. AVI Publ. Co., Westport, Connecticut.

- Farrall Arthur W. (1979), Food Engineering Systems, Vol. 2. AVI Publ. Co., Westport, Connecticut.

- Foust, A.S., L.A. Wenzel, C.W. Clump, L.Maus and L.B. Andersen. (1960), Principles of Unit Operations. New York, John Wiley & Sons, INC. London.

- Harper John C. (1976), Elements of Food Engineering. The AVI Publishing Company, INC., Westport, Connecticut.

- Heldman, Dennis R., and R. Paul Singh, (1980), Food Process Engineering, Second Edition, AVI Publishing Co., Westport, Conn.

- Henderson S.M. & R.L. Perry. (1976), Agricultural Process Engineering Third edition. The AVI Publishing Company, INC Westport. Connecticut.

- Joslyn, Maynard A., and J.H. Heid, (1963), Food Processing Operations, Vol. I., AVI Publishing Co., Westport, Connecticut.

- Mayhew, Y.R., and G.F.C.Rogers, (1974), Thermodynamic and Transport Properties of Fluids. S.I. Units, Second Edition, Oxford Basil Blackwell.

- Schwartzberg, Henery G., and M.A.Rao (1990), Editors, Biotechnology and Food Process Engineering. IFT Basic Symposium Series, Marcel Dekker, Inc., New York and Basel.

- Toledo, Romeo T.,(1991), Fundemeatals of Food Process Engineering, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York.

- Treybal Robert E. (1955), Chemical Engineering Series. McGraw-Hill Book Company, Inc. New York, Toronto London.

- Van Arsdel, W.B., Copley, M.J. and Morgan, A.J.,Jr. (1973), Food Dehydration, 2nd Edition, Vol. 1 and 2. AVI Publishing Co., Westport, Conn.

- Watson, E. L., and Harper, J. C. (1988). ,Elements of Food Engineering, 2nd ed. Van Nostrand Reinhold, New York .

- Zemansky Mark W. (1957), Heat and Thermodynamics. McGraw-Hill Book company, INC. New York Toronto London.

ثانيا : المراجع العربيه :

- أ.د. أحمد فريد السهريجى (١٩٦٨ ، ١٩٨٠)
مذكرات هندسة التصنيع الزراعى .
كلية الزراعه / جامعة عين شمس

- أ.د. صلاح الدين محمود النبوى ، أ.د. يوسف امين والى ، أ.د. أحمد فريد السهريجى ، أ.د. عادل سعد الدين عبد القادر ، أ.د. أحمد أحمد جويلى ، أ.د. يحيى محمد حسن (١٩٧٠).
الحاصلات البستانيه إعدادها وانضاجها وتخزينها وتصديرها.
دار المعارف بمصر.

- أ.د. محمود مصطفى غنيم (١٩٦٤ ، ١٩٦٧)
الهندسه الحراريه جزء أول ، ثانى .
مطبعة المعرفه - القاهره .

الملاحـــــق

Appendices

ملحق رقم (١)

جداول التحويل للوحدات

Tables of Conversion Units

Some Useful Conversion Factors

To Convert from	to	Multiply by
Acceleration		
ft/s^2	m/s^2	$3.048\ 000 \times 10^{-1}$
Standard gravity	m/s^2	9.806 650
Standard gravity	ft/s^2	$3.217\ 405 \times 10^{1}$
m/s^2	ft/s^2	3.280 840
Area		
acre	m^2	$4.046\ 856 \times 10^{3}$
acre	ft^2	$4.356\ 000 \times 10^{4}$
ft^2	m^2	$9.290\ 304 \times 10^{-2}$
m^2	ft^2	$1.076\ 391 \times 10^{1}$
cm^2	m^2	$1.000\ 000 \times 10^{-4}$
ft^2	$in.^2$	$1.440\ 000 \times 10^{2}$
$in.^2$	m^2	$6.451\ 600 \times 10^{-4}$
Energy		
Btu (international)	kJ	1.055 056
Btu	kcal	$2.519\ 958 \times 10^{-1}$
kcal	kJ	4.186 800
kW - h	kJ	$3.600\ 000 \times 10^{3}$
kW - h	Btu	3.413×10^{3}
hp - h	Btu	2.545×10^{3}
J	ergs	$1.000\ 000 \times 10^{7}$
Btu	ft-lbf	$7.781\ 963 \times 10^{2}$
ft - lbf	kJ	$1.355\ 818 \times 10^{-3}$
Energy per Unit Mass		
Btu/lbm	kJ/kg	2.326 000
Force		
lbf	N	4.448 222

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Length		
angstrom	m	$1.000\ 000 \times 10^{-10}$
caliber	m	$2.540\ 000 \times 10^{-4}$
fathom	m	1.828 800
ft	m	$3.048\ 000 \times 10^{-1}$
inch	m	$2.540\ 000 \times 10^{-2}$
mile	m	$1.609\ 344 \times 10^{3}$
mile	ft	5.280×10^{3}
yard	m	$9.144\ 000 \times 10^{-1}$
Mass		
carat	kg	$2.000\ 000 \times 10^{-4}$
grain	kg	$6.479\ 891 \times 10^{-5}$
lbm	kg	$4.535\ 924 \times 10^{-1}$
kg	lbm	2.204 622
kg	slug	$6.852\ 1 \times 10^{-2}$
slug	lbm	$3.217\ 405 \times 10^{1}$
ton	lbm	2.000×10^{3}
ton	kg	$9.071\ 847 \times 10^{2}$
Mass per Unit Volume (density)		
lbm/ft^3	kg/m^3	$1.601\ 846 \times 10^{1}$
$lbm/in.^3$	kg/m^3	$2.767\ 990 \times 10^{4}$
lbm/gal	kg/m^3	$1.198\ 264 \times 10^{2}$
Power		
Btu/h	W (watt)	$2.930\ 711 \times 10^{-1}$
J/s	W	1.000 000
erg/s	W	$1.000\ 000 \times 10^{-7}$
ft - lbf/s	W	1.355 818
hp	W	$7.456\ 999 \times 10^{2}$
hp	ft - lbf/s	5.50×10^{2}
hp	ft - lbf/min	3.3000×10^{4}
hp (boiler)	Btu/h	$3.347\ 14 \times 10^{4}$
hp (hoiler)	kW	9.809 50

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Pressure		
std atm	kPa	$1.013\ 25 \times 10^{2}$
std atm	lbf/in^2	$1.469\ 6 \times 10^{1}$
cm Hg (0^oC)	kPa	1.333 22
in. Hg (32^oF)	kPa	3.386 389
in. H_2O (60^oF)	kPa	$2.488\ 4 \times 10^{-1}$
bar	kPa	$1.000\ 000 \times 10^{2}$
bar	$lbf/in.^2$	$1.450\ 377 \times 10^{1}$
$lbf/in.^2$	kPa	6.894 757
in. Hg (32^oF)	$lbf/in.^2$	$4.911\ 542 \times 10^{-1}$
ft H_2O (60^oF)	$lbf/in.^2$	$4.330\ 943 \times 10^{-1}$
ft H_2O (60^oF)	kPa	2.986 08
$dyne/cm^2$	kPa	$1.000\ 000 \times 10^{-4}$
Specific Heat		
Btu/lbm. ^oF	kJ/kg. K	4.186 800
cal/g. ^oC	Btu/lbm. ^oF	1.000 000
Thermal Conductivity		
Btu/ft - h - ^oF	W/m . K	1.730 6
Btu . in./ft^2 . h . ^oF	W/m . K	1.442×10^{-2}
cal/cm . h . ^oC	Btu/ft . h . ^oF	$6.719\ 69 \times 10^{-2}$
Thermal Conductance		
Btu/ft^2 - h - ^oF	W/m^2 . K	5.674 466
Temperature		
^oC	K	$T\ K = T\ ^oC + 273.15$
^oF	^oR	$T\ ^oR = T\ ^oF + 459.67$
K	^oR	$T\ ^oR = T\ K \times 1.8$
^oC	^oF	$T\ ^oF = (T\ ^oC+273.15) \times 1.8-459.67$
^oF	^oC	$T^oC = (T\ ^oF+459.67) / 1.8-273.15$
Time		
day	s	$8.640\ 999 \times 10^{4}$
hour	s	$3.600\ 000 \times 10^{3}$
year	s	$3.153\ 600 \times 10^{7}$
Velocity		
ft/s	m/s	$3.048\ 888 \times 10^{-1}$
miles/h	km/h	1.609 344
knot	m/s	$5.144\ 444 \times 10^{-1}$

(Continued)

To Convert from	to	Multiply by
Viscosity		
centipoise	Pa . s	$1.000\ 000 \times 10^{-3}$
centistokes	m^2/s	$1.000\ 000 \times 10^{-6}$
lbm/ft . s	Pa . s	1.488 164
lbf . s/ft^2	Pa . s	$4.788\ 026 \times 10^{1}$
lbf . s/ft^2	lbm/ft . s	$3.217\ 4 \times 10^{1}$
Volume		
acre . ft	m^3	$1.233\ 483 \times 10^{3}$
barrel (42 gal)	m^3	$1.589\ 873 \times 10^{-1}$
ft^3	m^3	$2.831\ 685 \times 10^{-2}$
ft^3	$in.^3$	$1.728\ 000 \times 10^{3}$
$in.^3$	m^3	$1.638\ 706 \times 10^{-5}$
ft^3	gallons	7.480 52
liter	m^3	$1.000\ 000 \times 10^{-3}$
gallons	liter	3.785 412
gallons	m^3	$3.785\ 412 \times 10^{-3}$
gallons	ft^3	$1.336\ 81 \times 10^{-1}$
quart (U.S. liquid)	m^3	$9.463\ 529 \times 10^{-4}$
pint (U.S. liquid)	liter	$4.731\ 765 \times 10^{-1}$

Source: Batty and Folkman (1984).

ملحق رقم (٢)

جداول البخار

Steam Tables

Thermodynamic Properties of Steam

The following symbols and units of measurement are used in tables:

i	$\frac{kcal}{kg}$	enthalpy.
i'	$\frac{kcal}{kg}$	enthalpy of boiling water.
i"	$\frac{kcal}{kg}$	enthalpy of dry saturated steam.
P ata = kg/cm^2		pressure.
L	$\frac{kcal}{kg}$	evaporation heat.
t	^oC	temperature.
t s	^oC	temperature of saturation.
T	K	temperature absolute.
v	$\frac{m^3}{kg}$	specific volume.
v'	$\frac{m^3}{kg}$	specific volume of boiling water.
v"	$\frac{m^3}{kg}$	specific volume of dry saturated steam.

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
0.010	6.698	0.0010001	131.6	6.73	600.2	593.5
0.015	12.737	0.0010006	80.63	12.78	602.9	590.1
0.020	17.204	0.0010013	68.25	17.25	604.9	587.6
0.025	20.776	0.0010020	55.27	20.82	606.4	585.6
0.030	23.772	0.0010027	46.52	23.81	607.8	584.0
0.035	26.359	0.0010034	40.22	26.39	608.9	582.5
0.040	28.641	0.0010040	35.46	28.67	609.8	581.1
0.045	30.69	0.0010046	31.71	30.71	610.7	580.0
0.050	32.55	0.0010052	28.72	32.57	611.5	578.9
0.055	34.25	0.0010058	26.26	34.27	612.3	578.0
0.060	35.82	0.0010063	24.19	35.83	612.9	577.1
0.065	37.29	0.0010069	22.43	37.30	613.6	576.3
0.070	38.66	0.0010074	20.91	38.67	614.1	575.4
0.075	39.95	0.0010079	19.59	39.96	614.7	574.7
0.080	41.16	0.0010084	18.45	41.16	615.2	574.0
0.085	42.32	0.0010088	17.41	42.32	615.7	573.4
0.090	43.41	0.0010093	16.50	43.41	616.1	572.7
0.095	44.46	0.0010097	15.68	44.46	616.6	572.1
0.10	45.45	0.0010101	14.95	45.45	617.0	571.6
0.11	47.33	0.0010109	13.66	47.32	617.8	570.5
0.12	49.06	0.0010117	12.59	49.05	618.6	569.5
0.13	50.67	0.0010124	11.67	50.66	619.3	568.6
0.14	52.18	0.0010131	10.89	52.17	619.9	567.7
0.15	53.60	0.0010138	10.20	53.59	620.5	566.9
0.16	54.94	0.0010145	9.603	54.93	621.1	566.2
0.17	56.21	0.0010151	9.073	56.19	621.6	565.4
0.18	57.41	0.0010157	8.601	57.39	622.1	564.7
0.19	58.57	0.0010163	8.172	58.55	622.6	564.0
0.20	59.67	0.0010169	7.789	59.65	623.1	563.4
0.21	60.72	0.0010175	7.442	60.70	623.5	562.8
0.22	61.74	0.0010181	7.122	61.72	623.9	562.2
0.23	62.71	0.0010186	6.833	62.69	624.3	561.6
0.24	63.65	0.0010191	6.565	63.63	624.6	561.0
0.25	64.56	0.0010196	6.318	64.54	625.0	560.5
0.26	65.44	0.0010202	6.088	65.42	625.4	560.0
0.27	66.29	0.0010206	5.876	66.27	625.7	559.4
0.28	67.11	0.0010211	5.679	67.09	626.1	559.0
0.29	67.91	0.0010216	5.495	67.89	626.4	558.5
0.30	68.68	0.0010220	5.324	68.66	626.8	558.1

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
0.32	70.16	0.0010229	5.013	70.14	627.4	557.3
0.34	71.57	0.0010237	4.736	71.56	627.9	556.3
0.36	72.91	0.0010245	4.489	72.90	628.5	555.6
0.38	74.19	0.0010253	4.267	74.18	629.0	554.8
0.40	75.42	0.0010261	4.066	75.41	629.5	554.1
0.45	78.27	0.0010279	3.641	78.27	630.6	552.3
0.50	80.86	0.0010296	3.299	80.86	631.6	550.7
0.55	83.25	0.0010312	3.017	83.26	632.6	549.3
0.60	85.45	0.0010327	2.782	85.47	633.5	548.0
0.65	87.51	0.0010341	2.581	87.54	634.3	546.8
0.70	89.45	0.0010355	2.408	89.49	635.1	545.6
0.75	91.27	0.0010360	2.257	91.32	635.8	544.5
0.80	92.99	0.0010381	2.125	93.05	636.4	543.3
0.85	94.62	0.0010393	2.008	94.69	637.0	542.3
0.90	96.18	0.0010405	1.903	96.26	637.6	541.3
0.95	97.66	0.0010417	1.810	97.75	638.2	540.4
1.0	99.09	0.0010428	1.725	99.19	638.8	539.6
1.1	101.76	0.0010448	1.578	101.87	639.8	537.9
1.2	104.25	0.0010468	1.455	104.38	640.7	536.3
1.3	106.56	0.0010487	1.350	106.72	641.6	534.3
1.4	108.74	0.0010505	1.259	108.92	642.3	533.4
1.5	110.79	0.0010522	1.181	110.99	643.1	532.1
1.6	112.73	0.0010538	1.111	112.95	643.8	530.8
1.7	114.57	0.0010554	1.050	114.81	644.5	529.7
1.8	116.33	0.0010570	0.9954	116.60	645.1	528.5
1.9	118.01	0.0010585	0.9462	118.30	645.7	527.4
2.0	119.62	0.0010600	0.9018	119.94	646.3	526.4
2.1	121.16	0.0010614	0.8616	121.5	646.8	525.3
2.2	122.65	0.0010627	0.8248	123.0	647.3	524.3
2.3	124.08	0.0010640	0.7912	124.5	647.8	523.3
2.4	125.46	0.0010653	0.7603	125.9	648.3	522.4
2.5	126.79	0.0010666	0.7318	127.2	648.7	521.5
2.6	128.08	0.0010678	0.7055	128.5	649.2	520.7
2.7	129.34	0.0010691	0.6808	129.8	649.6	519.8
2.8	130.55	0.0010703	0.6581	131.1	650.0	518.9
2.9	131.73	0.0010714	0.6368	132.3	650.3	518.0

(continued)

P	t	v'	v''	i'	i''	L
kg/cm²	°C	m³/kg	m³/kg	kcal/kg	kcal/kg	kcal/kg
3.0	132.88	0.0010726	0.6169	133.4	650.7	517.3
3.1	134.00	0.0010737	0.5982	134.6	651.1	516.5
3.2	135.08	0.0010748	0.5807	135.7	651.4	515.7
3.3	136.14	0.0010758	0.5645	136.8	651.8	515.0
3.4	137.18	0.0010769	0.5465	137.8	652.1	514.3
3.5	138.19	0.0010779	0.5338	138.9	652.4	513.5
3.6	139.18	0.0010789	0.5199	139.9	652.7	512.8
3.7	140.15	0.0010800	0.5066	140.9	653.0	512.1
3.8	141.09	0.0010809	0.4942	141.8	653.3	511.5
3.9	142.02	0.0010819	0.4822	142.8	653.6	510.8
4.0	142.92	0.0010829	0.4709	143.7	653.9	510.2
4.1	143.81	0.0010838	0.4601	144.6	654.1	509.5
4.2	144.68	0.0010847	0.4498	145.5	654.4	508.9
4.3	145.54	0.0010857	0.4399	146.4	654.7	508.3
4.4	146.38	0.0010866	0.4305	147.3	654.9	507.6
4.5	147.20	0.0010875	0.4215	148.1	655.2	507.1
4.6	148.01	0.0010884	0.4129	149.0	655.4	506.5
4.7	148.81	0.0010893	0.4045	149.8	655.6	505.8
4.8	149.59	0.0010902	0.3966	150.6	655.9	505.3
4.9	150.36	0.0010910	0.3890	151.4	656.1	504.7
5.0	151.11	0.0010918	0.3817	152.1	656.3	504.2
5.2	152.59	0.0010935	0.3679	153.7	656.7	503.0
5.4	154.02	0.0010951	0.3550	155.1	657.1	502.0
5.6	155.41	0.0010967	0.3431	156.6	657.5	500.9
5.8	156.76	0.0010983	0.3319	158.0	657.9	499.9
6.0	158.08	0.0010998	0.3214	159.3	658.3	498.9
6.2	159.36	0.0011013	0.3116	160.7	658.6	497.9
6.4	160.61	0.0011028	0.3024	162.0	659.0	497.0
6.6	161.82	0.0011043	0.2938	163.2	659.3	496.1
6.8	163.01	0.0011057	0.2856	164.5	659.6	495.1
7.0	164.17	0.0011071	0.2778	165.7	659.9	494.2
7.2	165.31	0.0011085	0.2705	166.9	660.2	493.3
7.4	166.42	0.0011099	0.2636	168.0	660.4	492.4
7.6	167.51	0.0011113	0.2570	169.2	660.7	491.5
7.8	168.57	0.0011126	0.2507	170.3	661.0	490.7
8.0	169.61	0.0011139	0.2448	171.4	661.2	489.8
8.2	170.63	0.0011152	0.2391	172.4	661.4	489.0
8.4	171.63	0.0011165	0.2337	173.4	661.7	488.3
8.6	172.61	0.0011177	0.2286	174.5	661.9	487.4
8.8	173.58	0.0011189	0.2236	175.5	662.1	486.6

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v" m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
12.5	188.92	0.0011399	0.1599	191.7	665.3	473.6
13.0	190.71	0.0011426	0.1540	193.6	665.6	472.0
13.5	192.45	0.0011451	0.1485	195.5	665.9	470.4
14.0	194.13	0.0011476	0.1434	197.3	666.2	468.9
14.5	195.77	0.0011501	0.1387	199.1	666.4	467.4
15.0	197.36	0.0011525	0.1342	200.7	666.7	465.9
15.5	198.91	0.0011548	0.1300	202.4	666.9	464.5
16.0	200.43	0.0011572	0.1261	204.0	667.1	463.1
16.5	201.91	0.0011595	0.1224	205.6	667.3	461.7
17.0	203.35	0.0011618	0.1189	207.2	667.5	460.3
17.5	204.76	0.0011640	0.1156	208.7	667.7	459.0
18.0	206.14	0.0011662	0.1125	210.2	667.7	457.6
18.5	207.49	0.0011684	0.1095	211.7	668.0	456.3
19.0	208.81	0.0011706	0.1067	213.1	668.2	455.1
19.5	210.11	0.0011728	0.1040	214.5	668.3	453.8
20.0	211.38	0.0011749	0.1015	215.9	668.5	452.6
20.5	212.63	0.0011771	0.09907	217.3	668.6	451.3
21.0	213.85	0.0011792	0.09676	218.6	668.7	450.1
21.5	215.05	0.0011813	0.09456	220.0	668.8	448.8
22.0	216.23	0.0011833	0.09245	221.2	668.9	447.7
22.5	217.39	0.0011854	0.09042	222.5	668.9	446.4
23.0	218.53	0.0011874	0.08849	223.8	669.0	445.2
23.5	219.65	0.0011894	0.08663	225.0	669.1	444.1
24.0	220.75	0.0011914	0.08486	226.2	669.2	443.0
24.5	221.83	0.0011933	0.08316	227.4	669.2	441.8
25.0	222.90	0.0011953	0.08150	228.6	669.3	440.7
25.5	223.95	0.0011973	0.07991	229.8	669.3	439.5
26.0	224.99	0.0011992	0.07838	230.9	669.4	438.5
26.5	226.01	0.0012011	0.07692	232.1	669.4	437.3
27.0	227.01	0.0012030	0.07551	233.2	669.4	436.2
27.5	228.00	0.0012048	0.07414	234.3	669.5	435.2
28.0	228.98	0.0012067	0.07282	235.4	669.5	434.1
28.5	229.94	0.0012086	0.07155	236.5	669.5	433.0
29.0	230.89	0.0012105	0.07032	237.5	669.5	432.0
29.5	231.83	0.0012122	0.06913	238.6	669.6	431.0
30	232.76	0.0012142	0.06797	239.6	669.6	430.0
31	234.57	0.0012178	0.06578	241.7	669.6	427.9
32	236.35	0.0012215	0.06370	243.7	669.6	425.9
33	238.08	0.0012251	0.06176	245.6	669.6	423.9
34	239.77	0.0012286	0.05995	247.6	669.5	421.9

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v" m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
35	241.42	0.0012321	0.05819	249.5	669.5	420.0
36	243.04	0.0012356	0.05654	251.3	669.4	418.1
37	244.62	0.0012391	0.05499	253.1	669.3	416.2
38	246.17	0.0012425	0.05352	254.9	669.2	414.3
39	247.69	0.0012459	0.05211	256.7	669.2	412.5
40	249.18	0.0012493	0.05077	258.4	669.0	410.6
41	250.64	0.0012527	0.04950	260.1	668.9	408.8
42	252.07	0.0012561	0.04829	261.8	668.8	407.0
43	253.48	0.0012594	0.04713	263.4	668.7	405.3
44	254.87	0.0012628	0.04601	265.0	668.5	403.5
45	256.23	0.0012661	0.04495	266.6	668.4	401.8
46	257.56	0.0012694	0.04394	268.2	668.2	400.0
47	258.88	0.0012727	0.04296	269.8	668.0	398.2
48	260.17	0.0012759	0.04203	271.3	667.9	396.6
49	261.45	0.0012792	0.04112	272.8	667.7	394.9
50	262.70	0.0012825	0.04026	274.3	667.5	393.2
51	263.93	0.0012857	0.03943	275.8	667.4	391.6
52	265.15	0.0012890	0.03863	277.2	667.2	390.0
53	266.35	0.0012922	0.03785	278.7	667.0	388.3
54	267.53	0.0012954	0.03711	280.1	666.7	386.6
55	268.69	0.0012986	0.03639	281.5	666.6	385.1
56	269.84	0.0013018	0.03569	282.9	666.3	383.4
57	270.98	0.0013051	0.03502	284.3	666.1	381.8
58	272.10	0.0013083	0.03437	285.6	665.9	380.3
59	273.20	0.0013115	0.03374	287.0	665.6	378.6
60	274.29	0.0013147	0.03313	288.3	665.4	377.1
61	275.37	0.0013179	0.03255	289.7	665.1	375.4
62	276.43	0.0013211	0.03197	291.0	664.8	373.8
63	277.48	0.0013243	0.03142	292.3	664.6	372.3
64	278.51	0.0013275	0.03089	293.6	664.3	370.8
65	279.54	0.0013306	0.03036	294.8	664.0	369.2
66	280.55	0.0013338	0.02986	296.1	663.7	367.6
67	281.55	0.0013370	0.02937	297.3	663.5	366.2
68	282.54	0.0013402	0.02889	298.6	663.2	364.6
69	283.52	0.0013434	0.02843	299.8	662.9	363.1

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v" m^3/kg	I' kcal/kg	I" kcal/kg	L kcal/kg
70	284.48	0.0013466	0.02798	301.0	662.6	361.6
71	285.44	0.0013498	0.02754	302.3	662.2	359.9
72	286.39	0.0013530	0.02711	303.5	661.9	358.4
73	287.32	0.0013561	0.02669	304.6	661.6	356.9
74	288.25	0.0013593	0.02629	305.8	661.3	355.5
75	289.17	0.0013626	0.02589	307.0	661.0	354.0
76	290.08	0.0013658	0.02550	308.2	660.7	352.0
77	290.97	0.0013690	0.02513	309.4	660.3	351.0
78	291.86	0.0013722	0.02476	310.5	660.0	349.5
79	292.75	0.0013755	0.02440	311.7	659.7	348.0
80	293.62	0.0013787	0.02405	312.8	659.3	346.5
81	294.48	0.0013819	0.02372	313.9	659.0	345.1
82	295.34	0.0013852	0.02338	315.0	658.6	343.6
83	296.19	0.0013885	0.02305	316.2	658.3	342.1
84	297.03	0.0013917	0.02273	317.3	657.9	340.6
85	297.86	0.0013950	0.02243	318.4	657.6	339.2
86	298.69	0.0013983	0.02212	319.5	657.2	337.7
87	299.51	0.0014016	0.02182	320.6	656.8	336.2
88	300.32	0.0014049	0.02153	321.6	656.5	334.8
89	301.12	0.0014082	0.02124	322.7	656.1	333.4
90	301.92	0.0014115	0.02096	323.8	655.7	331.9
91	302.71	0.0014148	0.02069	324.9	655.3	330.4
92	303.49	0.0014181	0.02042	325.9	655.0	329.1
93	304.27	0.0014215	0.02016	327.0	654.6	327.6
94	305.04	0.0014249	0.01990	328.0	654.2	326.2
95	305.80	0.0014282	0.01965	329.1	653.8	324.7
96	306.56	0.0014316	0.01940	330.1	653.3	323.2
97	307.31	0.0014350	0.01916	331.2	652.9	321.8
98	308.06	0.0014384	0.01892	332.2	652.5	320.3
99	308.80	0.0014418	0.01869	332.2	652.1	318.9
100	309.53	0.0014453	0.01846	334.2	651.7	317.5
102	310.98	0.0014522	0.01802	336.3	650.8	314.5
104	312.41	0.0014591	0.01759	338.3	650.0	311.7
106	313.82	0.0014662	0.01717	340.3	649.1	308.8
108	315.21	0.0014733	0.01677	342.3	648.1	305.8
110	316.58	0.001480	0.01638	344.2	647.2	303.0
112	317.93	0.001488	0.01601	346.2	646.3	300.1
114	319.26	0.001495	0.01565	348.2	645.3	297.2
116	320.57	0.001502	0.01530	350.1	644.4	294.3
118	321.87	0.001510	0.01496	352.0	643.5	291.5

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v" m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
120	323.15	0.001517	0.01463	353.9	642.5	288.6
122	324.41	0.001525	0.01432	355.8	641.4	285.6
124	325.65	0.001533	0.01401	357.7	640.4	282.7
126	326.88	0.001541	0.01371	359.6	639.4	279.8
128	328.10	0.001549	0.01341	361.5	638.3	276.8
130	329.30	0.001557	0.01313	363.4	637.2	273.8
132	330.48	0.001565	0.01286	365.2	636.2	271.0
134	331.65	0.001574	0.01259	367.1	635.1	268.0
136	332.81	0.001582	0.01233	369.0	634.0	265.0
138	333.96	0.001591	0.01207	370.8	632.8	262.0
140	335.09	0.001600	0.01182	372.7	631.7	259.0
142	336.21	0.001608	0.01159	374.5	630.5	256.0
144	337.31	0.001617	0.01134	376.4	629.4	253.0
146	338.40	0.001625	0.01111	378.2	628.1	249.9
148	339.49	0.001635	0.01088	380.1	626.9	246.8
150	340.56	0.001644	0.01066	381.9	625.6	243.7
152	341.61	0.001653	0.01045	383.7	624.3	240.6
154	342.66	0.001663	0.01024	385.6	623.0	237.4
156	343.70	0.001673	0.01003	387.4	621.6	234.2
158	344.72	0.001683	0.009826	389.3	620.3	231.0
160	345.74	0.001693	0.009625	391.1	618.9	227.8
162	346.74	0.001704	0.009431	392.9	617.5	224.5
164	347.74	0.001715	0.009237	394.8	616.0	221.2
166	348.72	0.001726	0.009048	396.7	614.5	217.8
168	349.70	0.001737	0.008862	398.6	613.0	214.4
170	350.66	0.001748	0.008681	400.4	611.5	211.1
172	351.62	0.001760	0.008501	402.3	609.8	207.5
174	352.56	0.001772	0.008325	404.2	608.2	204.0
176	353.50	0.001785	0.008150	406.2	606.5	200.3
178	345.43	0.001798	0.007974	408.1	604.7	196.6
180	355.35	0.001812	0.007803	410.1	602.8	192.7
182	356.26	0.001826	0.007633	412.2	600.9	188.7
184	357.16	0.001840	0.007466	414.2	599.0	184.8
186	358.06	0.001856	0.007300	416.2	597.1	180.9
188	358.94	0.001873	0.007138	418.2	595.1	176.9
190	359.82	0.001890	0.00697	420.4	593.0	172.6
192	360.69	0.001906	0.00682	422.3	591.0	168.7
194	361.55	0.001923	0.00666	424.4	588.9	164.5
196	362.40	0.001942	0.00650	426.6	586.6	160.0
198	363.25	0.001963	0.00634	428.9	584.0	155.1

(continued)

P kg/cm^2	t °C	v' m^3/kg	v" m^3/kg	i' kcal/kg	i" kcal/kg	L kcal/kg
200	364.08	0.001987	0.00618	431.3	581.4	150.1
202	364.91	0.00201	0.00601	433.8	578.5	144.7
204	365.74	0.00204	0.00585	436.4	575.6	139.2
206	366.55	0.00207	0.00568	438.9	572.6	133.6
208	367.36	0.00210	0.00552	441.7	569.4	127.7
210	368.16	0.00213	0.00535	444.5	565.9	121.4
212	368.95	0.00217	0.00517	447.6	562.2	114.6
214	369.74	0.00221	0.00499	450.8	558.2	107.4
216	370.51	0.00226	0.00481	454.2	553.8	99.6
218	371.29	0.00231	0.00462	458.6	548.2	89.6
220	372.1	0.00238	0.00436	463.0	542.3	79.3
222	372.8	0.00247	0.00412	468.0	535.4	67.3
224	373.6	0.00267	0.00373	479.0	520.7	45.7

Source : El-Sahrigi (1986).

P	1.0		2.0		3.0	
	ts=99.09 i"=638.8 v" = 1.725		ts=119.62 i"=646.3 v" = 0.9018		ts=132.88 i"=650.7 v" = 0.6119	
t	v	i	v	i	v	i
100	1.730	639.2				
110	1.781	644.2				
120	1.830	649.0	0.9027	646.5		
130	1.878	653.7	0.9291	651.5		
140	1.926	658.4	0.9545	656.5	0.6296	654.5
150	1.975	663.0	0.9795	661.5	0.6472	659.7
160	2.023	667.8	1.003	666.4	0.6643	664.7
170	2.071	672.5	1.028	671.2	0.6810	669.6
180	2.119	677.2	1.052	657.9	0.6975	674.5
190	2.166	681.9	1.077	680.6	0.7140	679.3
200	2.214	686.6	1.101	685.4	0.7304	684.2
210	2.262	691.3	1.125	690.2	0.7468	689.0
220	2.310	696.0	1.149	695.0	0.7631	693.9
230	2.357	700.7	1.173	699.7	0.7793	698.7
240	2.405	705.5	1.197	704.5	0.7956	703.6
250	2.452	710.2	1.221	709.3	0.8119	708.4
260	2.500	714.9	1.245	714.1	0.8281	713.2
270	2.547	719.7	1.269	719.0	0.8442	718.1
280	2.595	724.5	1.293	723.8	0.8603	723.0
290	2.642	729.2	1.317	728.6	0.8763	727.9
300	2.690	734.0	1.341	733.4	0.8923	732.7
310	2.737	738.8	1.365	738.3	0.9083	737.6
320	2.784	743.6	1.389	743.1	0.9243	742.5
330	2.832	748.4	1.413	748.0	0.9403	747.5
340	2.880	753.2	1.437	753.0	0.9562	752.5
350	2.927	758.0	1.461	757.9	0.9722	757.4
360	2.975	762.9	1.485	762.8	0.9881	762.3
370	3.022	767.8	1.509	767.8	1.004	767.3
380	3.068	772.7	1.532	772.7	1.020	772.2
390	3.115	777.6	1.556	777.6	1.036	777.2
400	3.163	782.6	1.579	782.6	1.052	782.2
410	3.210	787.6	1.602	787.6	1.068	787.2
420	3.257	792.6	1.626	792.6	1.083	792.2
430	3.304	797.6	1.650	797.6	1.099	797.3
440	3.352	802.6	1.673	802.6	1.115	802.3
450	3.399	807.6	1.697	807.6	1.131	807.3
460	3.446	812.6	1.721	812.6	1.147	812.3
470	3.493	817.7	1.744	817.7	1.163	817.4
480	3.540	822.8	1.768	822.8	1.179	822.5
490	3.587	827.9	1.792	827.9	1.194	827.6

(continued)

P	4.0		5.0		6.0	
	ts =142.92 i"=653.9 v" = 0.4709		ts =151.11 i" =656.3 v"= 0.3817		ts=158.08 i"=658.3 v" = 0.3214	
t	v	i	v	i	v	i
150	0.4806	657.9				
160	0.4940	663.1	0.3917	661.3	0.3232	659.4
170	0.5070	668.2	0.4024	666.6	0.3326	664.8
180	0.5197	637.2	0.4129	671.7	0.3416	670.1
190	0.5323	678.1	0.4232	676.7	0.3504	675.4
200	0.5448	683.0	0.4334	681.7	0.3591	680.6
210	0.5573	687.9	0.4436	686.7	0.3677	685.7
220	0.5697	692.8	0.4537	691.7	0.3763	690.7
230	0.5821	697.7	0.4637	696.6	0.3848	695.7
240	0.5944	702.6	0.4736	701.6	0.3932	700.7
250	0.6067	707.5	0.4836	706.6	0.4016	705.7
260	0.6190	712.4	0.4935	711.5	0.4099	710.7
270	0.6312	717.3	0.5033	716.5	0.4181	715.7
280	0.6433	722.2	0.5131	721.5	0.4264	720.7
290	0.6555	727.1	0.5229	726.4	0.4346	725.7
300	0.6676	732.1	0.5327	731.4	0.4428	730.7
310	0.6796	737.1	0.5424	736.4	0.4509	735.8
320	0.6917	742.0	0.5521	741.4	0.4591	740.8
330	0.7037	746.9	0.5618	746.4	0.4672	745.8
340	0.7158	751.9	0.5715	751.4	0.4753	750.9
350	0.7278	756.9	0.5812	756.4	0.4834	755.9
360	0.7398	761.8	0.5908	761.4	0.4915	760.9
370	0.7518	766.8	0.6005	766.4	0.4996	766.0
380	0.7637	771.8	0.6101	771.4	0.5077	771.0
390	0.7756	776.8	0.6197	776.4	0.5157	776.0
400	0.7875	781.8	0.6294	781.5	0.5237	781.1
410	0.7995	786.8	0.6390	786.5	0.5318	786.1
420	0.8114	791.8	0.6485	791.5	0.5398	791.1
430	0.8233	796.9	0.6581	796.6	0.5478	796.2
440	0.8352	802.0	0.6676	801.7	0.5558	801.3
450	0.8471	807.1	0.6772	806.7	0.5637	806.4
460	0.8590	812.1	0.6867	811.7	0.5717	811.5
470	0.8709	817.2	0.6963	816.8	0.5797	816.6
480	0.8828	822.3	0.7058	821.9	0.5876	821.7
490	0.9418	827.4	0.7153	827.0	0.5956	826.8
500	0.9066	832.5	0.7248	832.1	0.6036	831.9
510	0.9185	837.6	0.7344	837.2	0.6115	837.0
520	0.9304	842.8	0.7439	842.4	0.6194	842.2
530	0.9423	848.0	0.7535	847.6	0.6273	847.4
540	0.9542	853.2	0.7629	852.8	0.6352	852.6

(continued)

P	7.0		8.0		9.0	
	ts =164.17 i"=659.9 v" = 0.2778		ts =169.61 i" =661.2 v"= 0.2448		ts =174.53 i"=662.3 v" = 0.2189	
t	v	i	v	i	v	i
170	0.2827	663.2	0.2450	661.5		
180	0.2906	668.8	0.2524	667.3	0.2226	665.5
190	0.2983	674.2	0.2594	672.8	0.2291	671.3
200	0.3059	679.4	0.2662	678.2	0.2353	676.8
210	0.3134	684.6	0.2729	683.5	0.2413	682.2
220	0.3209	689.7	0.2795	688.7	0.2472	687.5
230	0.3283	694.7	0.2860	693.8	0.2531	692.7
240	0.3356	699.8	0.2925	699.0	0.2589	698.0
250	0.3429	704.9	0.2990	704.1	0.2647	703.2
260	0.3501	709.9	0.3054	709.2	0.2704	708.4
270	0.3573	715.0	0.3117	714.3	0.2761	713.5
280	0.3644	720.0	0.3180	719.4	0.2818	718.6
290	0.3715	725.0	0.3242	724.4	0.2874	723.6
300	0.3785	730.1	0.3305	729.4	0.2930	728.7
310	0.3856	735.2	0.3367	734.5	0.2985	733.9
320	0.3926	740.2	0.3429	739.5	0.3040	739.0
330	0.3996	745.2	0.3490	744.6	0.3095	744.1
340	0.4066	750.3	0.3552	749.8	0.3150	749.2
350	0.4136	755.3	0.3613	754.9	0.3205	754.3
360	0.4206	760.3	0.3674	760.0	0.3260	759.4
370	0.4276	765.4	0.3735	765.1	0.3315	764.6
380	0.4345	770.5	0.3796	770.1	0.3369	769.7
390	0.4414	775.5	0.3857	775.2	0.3423	774.8
400	0.4483	780.6	0.3918	780.3	0.3477	779.9
410	0.4552	785.7	0.3978	785.4	0.3532	785.0
420	0.4621	790.8	0.4039	790.5	0.3586	790.1
430	0.4690	795.9	0.4099	795.6	0.3639	795.2
440	0.4759	801.0	0.4159	800.6	0.3693	800.3
450	0.4827	806.1	0.4219	805.7	0.3747	805.4
460	0.4896	811.2	0.4280	810.8	0.3800	810.5
470	0.4964	816.3	0.4340	815.9	0.3854	815.6
480	0.5033	821.4	0.4400	821.0	0.3907	820.8
490	0.5101	826.5	0.4460	826.2	0.3961	826.0
500	0.5169	831.7	0.4519	831.4	0.4014	831.2
510	0.5238	836.8	0.4579	836.6	0.4068	836.4
520	0.5306	842.0	0.4639	841.8	0.4121	841.6
530	0.5374	847.2	0.4699	847.0	0.4174	846.8
540	0.5442	852.4	0.4759	852.2	0.4227	852.0

(continued)

P	10.0		12.0		14.0	
	ts =179.04 i"=663.3 v" = 0.1980		ts =187.08 i" =664.9 v"= 0.1663		ts =194.13 i"=666.2 v" = 0.1434	
t	v	i	v	i	v	i
180	0.1987	663.8				
190	0.2046	669.7	0.1678	666.7		
200	0.2103	675.4	0.1728	672.9	0.1460	670.0
210	0.2159	681.0	0.1777	678.8	0.1505	676.3
220	0.2214	686.5	0.1825	684.5	0.1547	682.3
230	0.2268	691.9	0.1872	690.0	0.1588	688.0
240	0.2321	697.2	0.1918	695.3	0.1629	693.5
250	0.2374	702.4	0.1963	700.6	0.1669	698.9
260	0.2426	707.6	0.2007	705.9	0.1708	704.2
270	0.2477	712.7	0.2051	711.2	0.1746	709.4
280	0.2529	717.8	0.2095	716.4	0.1784	714.6
290	0.2580	722.9	0.2138	721.5	0.1822	719.8
300	0.2630	728.0	0.2181	726.7	0.1859	725.1
310	0.2681	733.2	0.2223	731.9	0.1896	730.5
320	0.2731	738.4	0.2265	737.1	0.1933	735.8
330	0.2780	743.5	0.2306	742.3	0.1969	741.1
340	0.2829	748.7	0.2348	747.6	0.2005	746.4
350	0.2879	753.8	0.2390	752.8	0.2041	751.7
360	0.2929	758.9	0.2432	757.9	0.2077	756.9
370	0.2979	764.1	0.2474	763.1	0.2114	762.2
380	0.3028	769.2	0.2515	768.3	0.2150	767.4
390	0.3077	774.3	0.2557	773.5	0.2185	772.6
400	0.3126	779.5	0.2598	778.7	0.2220	777.9
410	0.3174	784.6	0.2638	783.8	0.2256	788.3
420	0.3223	789.7	0.2679	788.9	0.2291	788.3
430	0.3272	794.8	0.2720	794.1	0.2326	793.5
440	0.3320	799.9	0.2761	799.3	0.2361	798.7
450	0.3369	805.1	0.2801	804.5	0.2396	803.9
460	0.3417	810.2	0.2842	809.7	0.2431	809.1
470	0.3465	815.3	0.2882	814.9	0.2466	814.3
480	0.3513	820.5	0.2922	820.1	0.2501	819.5
490	0.3561	825.7	0.2962	825.3	0.2536	824.7
500	0.3609	830.9	0.3003	830.5	0.2570	829.9
510	0.3658	836.1	0.3044	835.7	0.2605	835.1
520	0.3706	841.3	0.3084	840.9	0.2639	840.3
530	0.3754	846.5	0.3124	846.1	0.2674	845.5
540	0.3802	851.7	0.3164	851.3	0.2709	850.7

(continued)

P	16.0		18.0		20.0	
	ts =200.43 i"=667.1 v" = 0.1261		ts =206.14 i" =667.8 v"= 0.1125		ts =211.38 i"=668.5 v" = 0.1015	
t	v	i	v	i	v	i
210	0.1300	673.5	0.1138	670.4		
220	0.1338	679.9	0.1175	677.0	0.1043	674.4
230	0.1375	685.8	0.1209	683.3	0.1077	681.0
240	0.1411	691.4	0.1242	689.3	0.1108	687.2
250	0.1447	696.9	0.1275	695.0	0.1138	693.1
260	0.1482	702.3	0.1307	700.6	0.1168	698.9
270	0.1517	707.8	0.1338	706.2	0.1198	704.6
280	0.1551	713.2	0.1369	711.8	0.1225	710.2
290	0.1585	718.6	0.1400	717.3	0.1253	715.8
300	0.1618	724.0	0.1430	722.8	0.1281	721.3
310	0.1651	729.4	0.1460	728.2	0.1308	726.9
320	0.1683	734.7	0.1490	733.6	0.1334	732.4
330	0.1715	740.0	0.1519	738.9	0.1360	737.9
340	0.1747	745.4	0.1548	744.3	0.1386	743.4
350	0.1779	750.7	0.1577	749.7	0.1412	748.8
360	0.1811	756.0	0.1605	755.0	0.1438	754.1
370	0.1843	761.3	0.1633	760.3	0.1465	759.4
380	0.1875	766.6	0.1661	765.6	0.1491	764.8
390	0.1906	771.8	0.1689	770.9	0.1516	770.1
400	0.1937	777.1	0.1717	776.2	0.1542	775.5
410	0.1969	782.3	0.1745	781.5	0.1567	780.8
420	0.2000	787.5	0.1773	786.7	0.1592	786.1
430	0.2031	792.8	0.1801	792.0	0.1617	791.4
440	0.2062	798.0	0.1829	797.3	0.1642	796.6
450	0.2092	803.2	0.1856	802.5	0.1667	801.9
460	0.2123	808.4	0.1884	807.7	0.1692	807.1
470	0.2154	813.6	0.1911	812.9	0.1717	812.4
480	0.2184	818.8	0.1938	818.2	0.1741	817.7
490	0.2215	824.1	0.1965	823.5	0.1765	823.0
500	0.2245	829.4	0.1992	828.8	0.1790	828.3
510	0.2276	834.6	0.2020	834.0	0.1815	833.5
520	0.2306	839.8	0.2047	839.3	0.1840	838.8
530	0.2336	845.0	0.2074	844.6	0.1864	844.1
540	0.2367	850.3	0.2101	849.9	0.1888	849.4
550	0.2398	855.6	0.2129	855.2	0.1913	854.7
560	0.2429	860.9	0.2156	860.5	0.1938	860.0
570	0.2459	866.2	0.2183	865.8	0.1963	865.3
580	0.2489	871.5	0.2210	871.1	0.1987	870.6
590	0.2519	876.8	0.2237	876.4	0.2011	875.9

ملحق رقم (٣)

جداول معامل انتقال الحراره
بالتوصيل لبعض المواد الصلبه غير الغذائيه
والمواد الغذائيه

Thermal Conductivity Tables of Some Solid non-food materials and foodstuffs

جدول معامل انتقال الحراره بالتوصيل لبعض المواد الصلبه غير الغذائيه *:

المادة	درجة الحراره (° م)	الكثافه (كجم/متر^٣)	الحراره النوعيه (ك.جول/كجم.كلفن)	معامل انتقال الحراره بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
المعادن				
المنيوم	٢٠	٢٧٠٧	٠.٨٩٦	٢٠٣
نحاس اصفر	٢٠	٨٥٢٢	٠.٣٨٥	٩٨
حديد زهر	٢٠	٧٥٩٣	٠.٤٦٥	٥٤
نحاس	٢٠	٨٩٥٤	٠.٣٨٣	٣٨٦
رصاص	٢٠	١١٣٧	٠.١٣٠	٣٥
فولاذ ١٪ كربون	٢٠	٨٧٠١	٠.٤٧٣	٤٥
فولاذ لايصدأ ٣٠٨	٢٠	٨٧٤٩	٠.٤٦١	١٥
فولاذ لايصدأ ٣٠٤	صفر	٧٨١٧	٠.٤٦١	١٤
قصدير	٢٠	٧٣٠٤	٠.٢٢٧	٦١
المواد العازله				
اسبستوس	٣٧.٨	٥٧.٧	–	٠.١٦٨
لوح فلين	٣٠.٠	١٦٠	–	٠.٠٤٣٣
لوح نيلي عازل	٢١.٠	٢٣٧	–	٠.٠٤٨
صوف الزجاج	٣٧.٨	٦٤.١	–	٠.٠٤١٤
رغوه البوليسترين	صفر	٢٤	–	٠.٠٣٦٤
رغوه البولي يورثين	صفر	٣٢	–	٠.٠٢٦
مواد البناء				
طوب البناء	٢٠	–	–	٠.٦٩٠
خرسانه حجريه	٢١	٢٣٠٧	٠.٨٣٧	٠.٩٣٥
زجاج النوافذ	٢١	٢٧٢٣	٠.٨٣٧	٠.٧٧٩
خشب البلوط الحبيبى (متعامد على الالياف)	٢١	٨١٧	٢.٣٨٦	٠.٢٠٨
خشب البلوط الحبيبى (موازى مع الالياف)	٢١	٨١٧	٢.٣٨٦	٠.٣٤٦
خشب الصنوبر الحبيبى (متعامد على الالياف)	٢١	٤٩٧	٢.٨٠٥	٠.١٠٤
خشب الصنوبر الحبيبى (موازى مع الالياف)	٢١	٤٩٧	٢.٨٠٥	٠.٢٤٢

---

* المصدر : أ.د. أحمد فريد السهريجى (١٩٨٦)

الملاحق

جدول معامل انتقال الحراره بالتوصيل لبعض المواد الغذائيه *:

المنتج	المحتوى الرطوبى (٪)	درجة الحراره (° م)	معامل انتقال الحراره بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
تفاح	٨٥.٦	٢٦:٢	٠.٢٩٣
صلصة تفاح	٧٨.٨	٢٦:٢	٠.٥١٦
لحم بقرى مجفد			
-عند ضغط ١٠٠٠ ملم زئبق	-	صفر	٠.٠٦٥
-عند ضغط ١٠٠٠٠ ملم زئبق	-	صفر	٠.٠٣٧
لحم بقرى خالص			
-متعامد على الالياف	٧٨.٩٠	٧	٠.٤٧٦
-متعامد على الالياف	٧٨.٩٠	٦٢	٠.٤٨٥
-موازى للالياف	٧٨.٧٠	٨	٠.٤٣١
-موازى للالياف	٧٨.٧٠	٦١	٠.٤٤٧
دهن لحم بقرى	-	٣٨:٢٤	٠.١٩٠
زبده	١٥.٠	٤٦	٠.١٩٧
سمك القد	٨٣.٠	٢.٨	٠.٥٤٤
ذره صفراء	٠.٩١	٥٢:٨	٠.١٤١
	٣٠.٢٠	٥٢:٨	٠.١٧٢
بيض كامل مجمد	-	-١٠:-٦	٠.٩٧٠
بياض البيض	-	٣٦	٠.٥٧٧
صفار البيض	-	٣٣	٠.٣٣٨
عضلة السمك	-	صفر : ١٠	٠.٥٥٧
ليمون هندى كامل	-	٣٠	٠.٤٥٠
عسل	١٢.٦٠	٢	٠.٥٠٢
	٨٠.٠٠	٢	٠.٣٤٤
	١٤.٨٠	٦٩	٠.٦٢٣
	٨٠.٠٠	٦٩	٠.٤١٥
عصير تفاح	٨٧.٤٠	٢٠	٠.٥٥٩
	٨٧.٤٠	٨٠	٠.٦٣٢
	٣٦.٠٠	٢٠	٠.٣٨٩
	٣٦.٠٠	٨٠	٠.٤٣٦

تابع ماقبله ١

المنتج	المحتوى الرطوبى (٪)	درجة الحراره (° م)	معامل انتقال الحراره بالتوصيل (وات/متر.كلفن)
لحم ضانى			
-متعامد على الالياف	٧١.٨٠	٥	٠.٤٥٠
		٦١	٠.٤٧٨
-موازى للالياف	–	٥	٠.٤١٥
	٩٠.٠٠	٦١	٠.٤٢٢
حليب	–	٣٧	٠.٥٣٠
حليب مكثف	٩٠.٠٠	٢٤	٠.٥٧١
		٧٨	٠.٦٤١
	٥٠.٠٠	٢٦	٠.٣٢٩
	–	٧٨	٠.٣٦٤
حليب مقشود	–	١.٥	٠.٥٣٨
	–	٨٠	٠.٦٣٥
حليب مجفف خالى من الدهن	٤.٢٠	٣٩	٠.٤١٩
زيت الزيتون	–	١٥	٠.١٨٩
	–	١٠٠	٠.١٦٣
برتقال ، مختلط	–	٣٠	٠.٤٣١
حبات البسله ذات نقط سوداء	–	١٧:٣	٠.٣١٢
لحم خنزير			
-متعامد على الالياف	٧٥.١٠	٦	٠.٤٨٨
-موازى للالياف		٦٠	٠.٤٥٠
	–	٤	٠.٤٤٣
		٦١	٠.٤٨٩
دهن خنزير	–	٢٥	٠.١٥٢
بطاطس ، خام	٨١.٥٠	٣٢:١	٠.٥٥٤
بطاطس ،جل نشوى	–	٦٧:١	٠.٠٤٠

تابع ماقبله ٢.

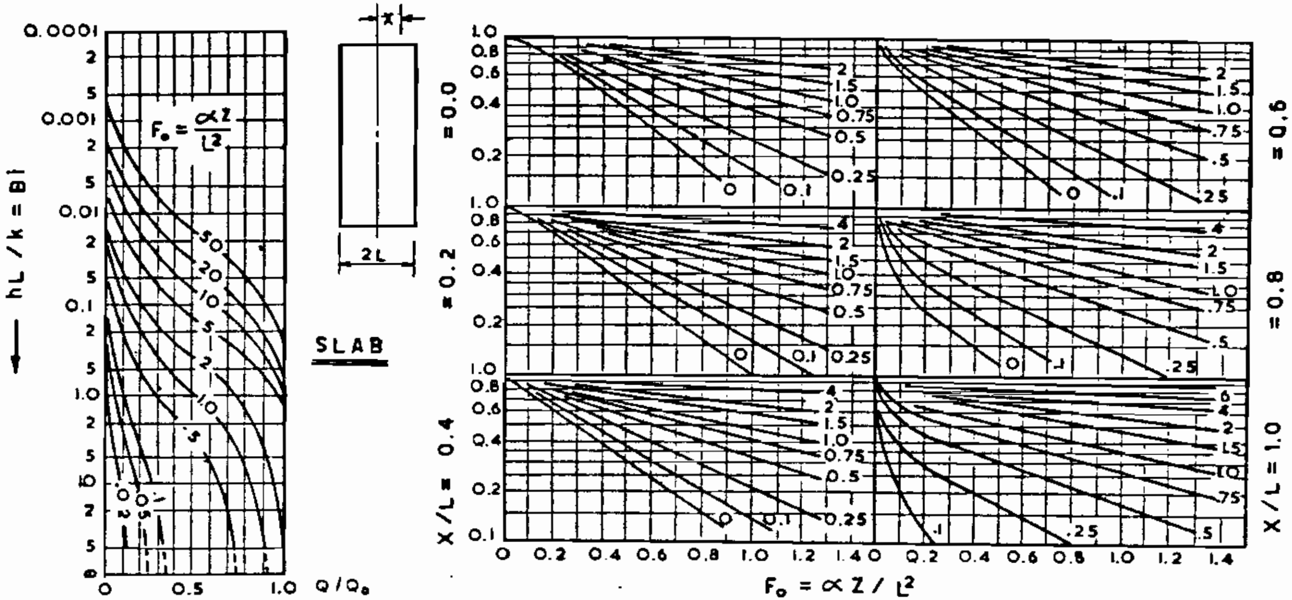
المنتج	المحتوى الرطوبى (٪)	درجة الحراره (° م)	معامل انتقال الحراره بالتوصيل (وات/متر كلفن)
طيور داجنه ،عضلات ساخنه	١ ٦٩:٩ ٧٤	٤ ٢٧	. ٤١٢
سمك السلمون			
-متعامد على الالياف	. ٧٣	٤	. ٥.٢
ملح	-	٨٧	. ٢٤٧
خليط النقانق	٧٢ ٦٤	٢٤	. ٤.٧
زيت فول الصويا	٢. ١٣	١.٠٧	. .٦٩
فراوله	-	-٤ ٢٥	. .٦٧٥
سكريات	-	٢٩ ٦٢	. ٢٢...٨٧
ديك رومى ، صدر			
متعامد على الالياف	. ٧٤	٣	. .٥.٢
موازى للالياف	. .٧٤	٣	. ٥٢٣
لحم عجل			
متعامد على الالياف	. ٧٥	٦	. ٤٧٦
موازى للالياف		٦٢	. ٤٨٩
	. ٧٥	٥	. ٤٤١
		٦.	. .٤٥٢
زيوت نباتيه وحيوانيه	-	٤ ١٨٧	. ١٦٩
دقيق القمح	٨. ٨		. .٤٥.
		٥ ٦٥	. .٦٨٩
		١.٧	. ٥٤٢
مصل اللبن (شرش)	-	٨.	. .٦٤١

---

* المصدر Heldman and Singh (1981)

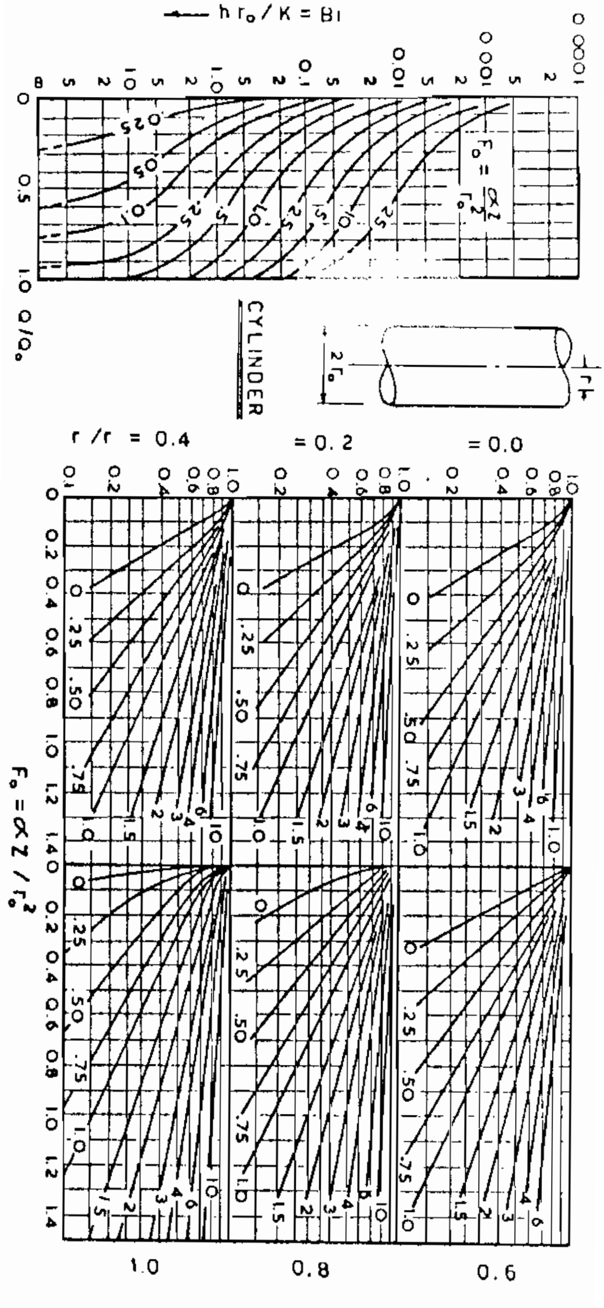
ملحق رقم (٤)

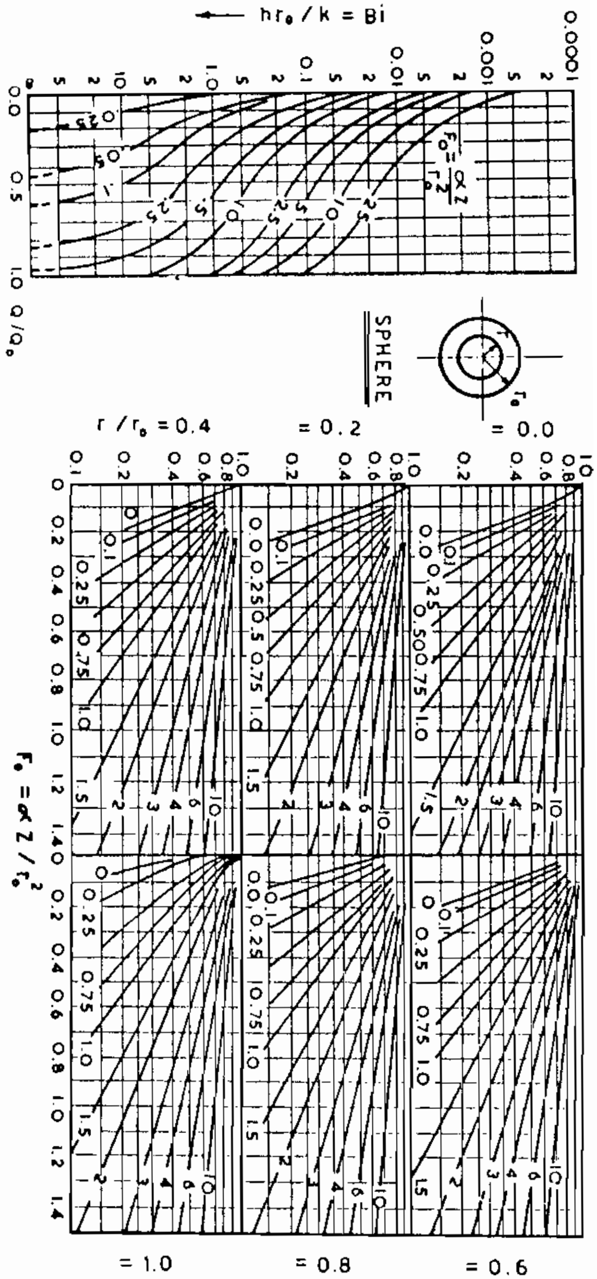
خرائط انتقال الحراره غير المستقر
Transient Heat Transfer Charts



TEMPERATURE DISTRIBUTION AND HEAT TRANSFER FLOW IN SLAB, CYL. AND SPHERE

Source : Eckert and Drake (1959)

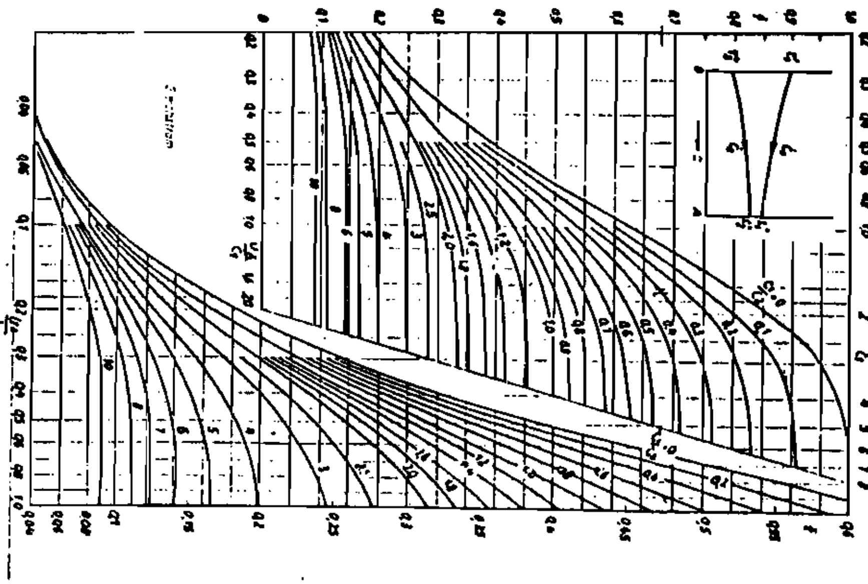

h r₀ / K = Bi
Q/Q₀
CYLINDER
2r₀
r
r / r = 0.4
= 0.2
= 0.0
F₀ = αZ / r₀²
1.0
0.8
0.6

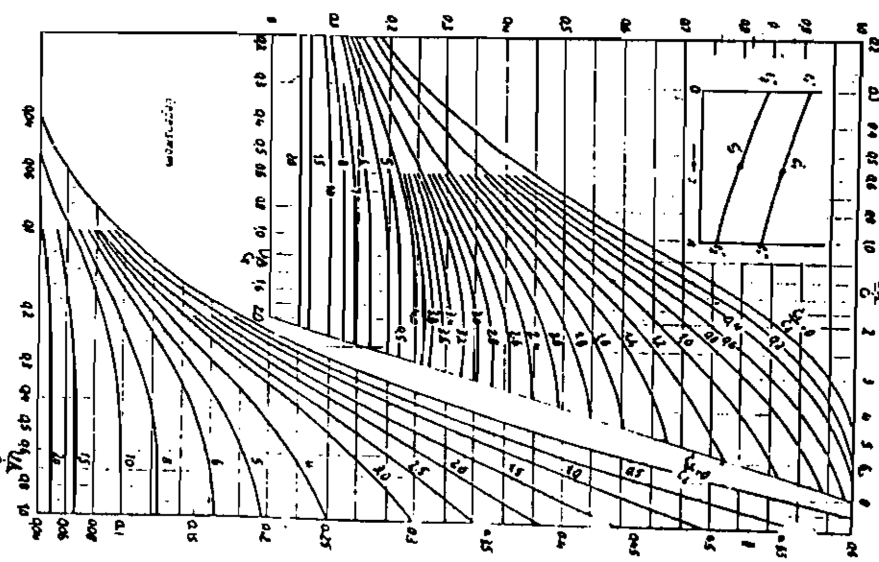


hr₀ / k = Bi
Q/Q₀
SPHERE
r / r₀ = 0.4
= 0.2
= 0.0
= 1.0
= 0.8
= 0.6
F₀ = αZ / r₀²

ملحق رقم (٥)

خرائط التبادل الحرارى
Heat Exchange Charts

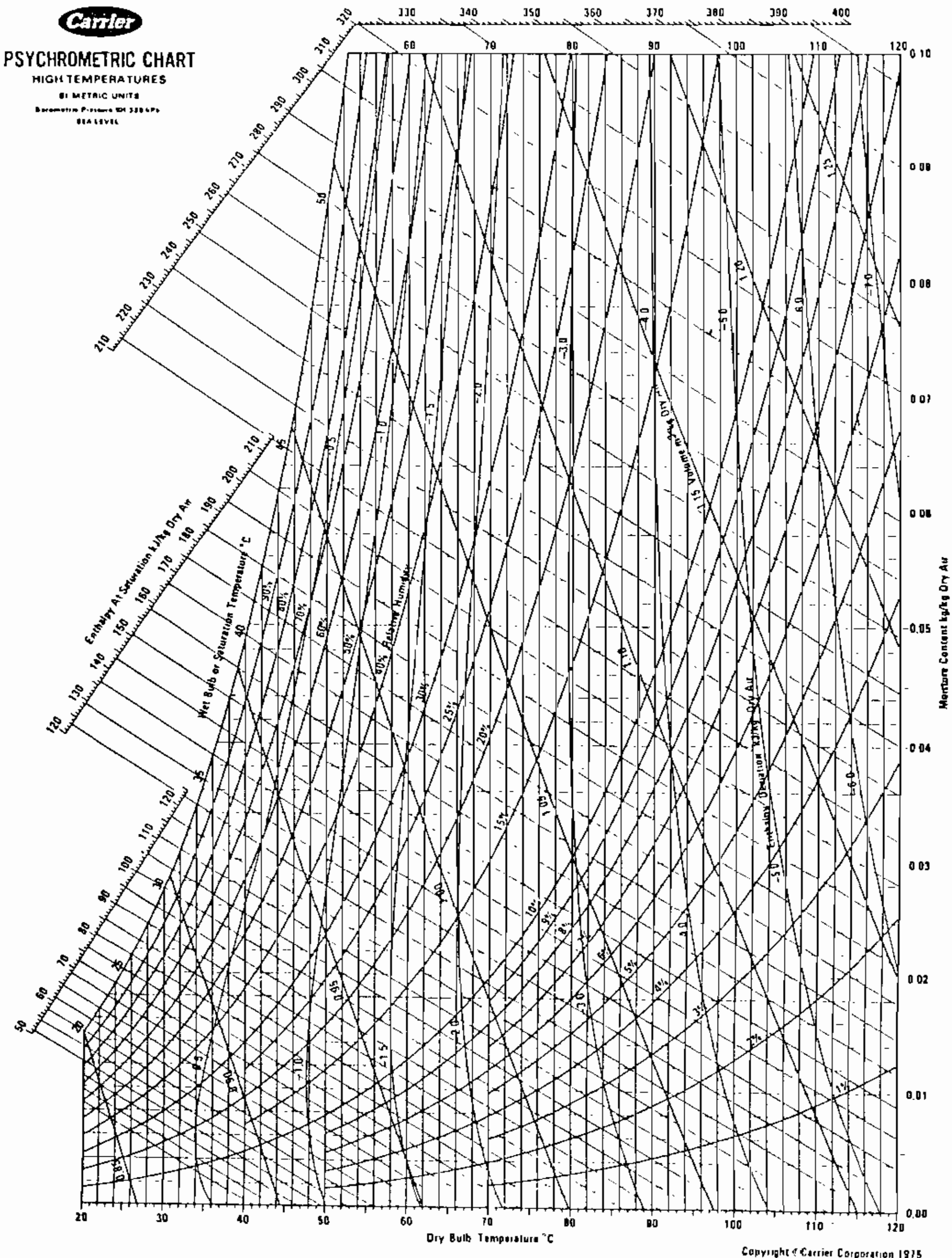




Source : Eckert and Drake (1959)

ملحق رقم (٦)

الخريطه السيكرومتريه
Psychrometric Chart



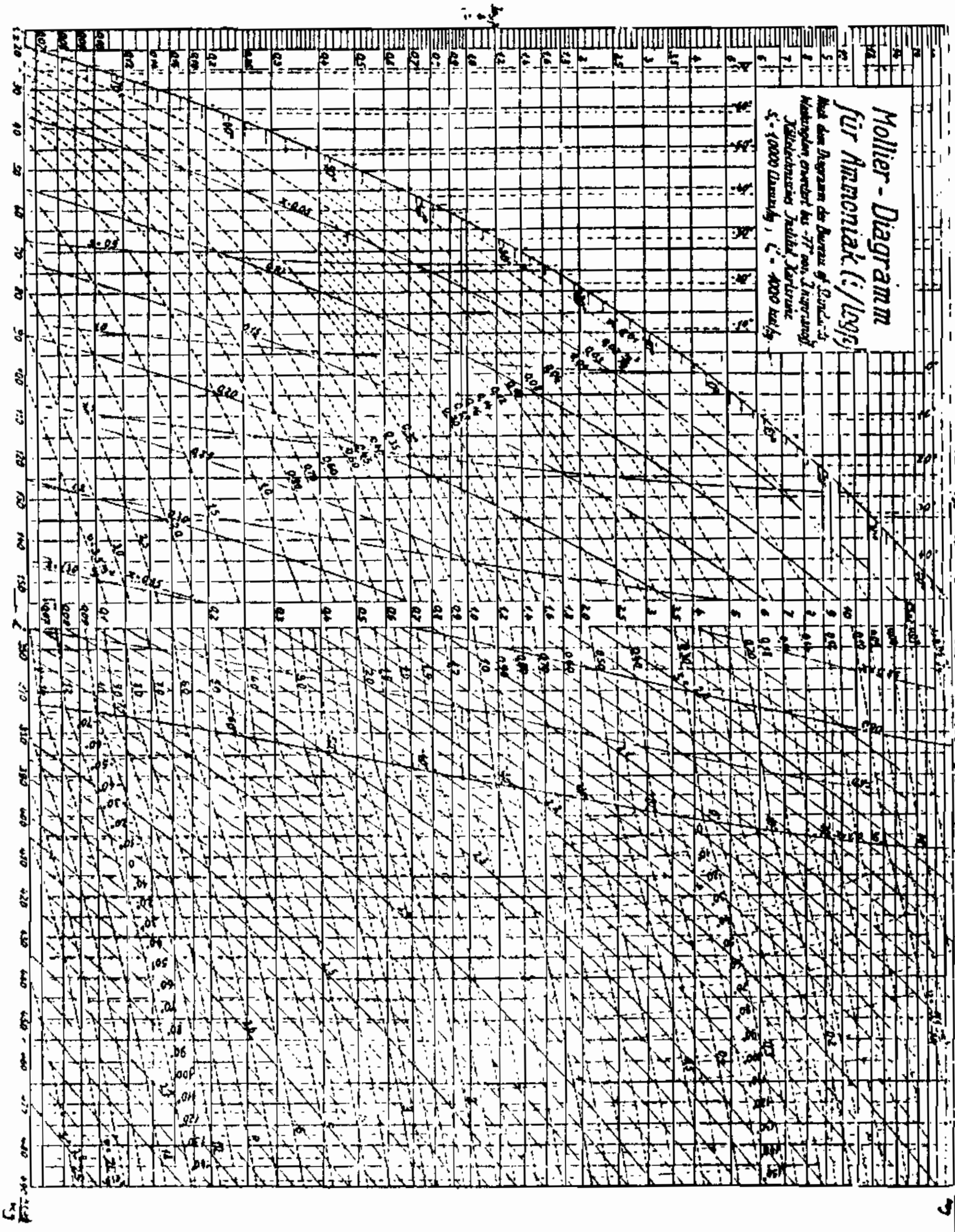
PSYCHROMETRIC CHART

Source : Copyright Carrier Corporation (1975)

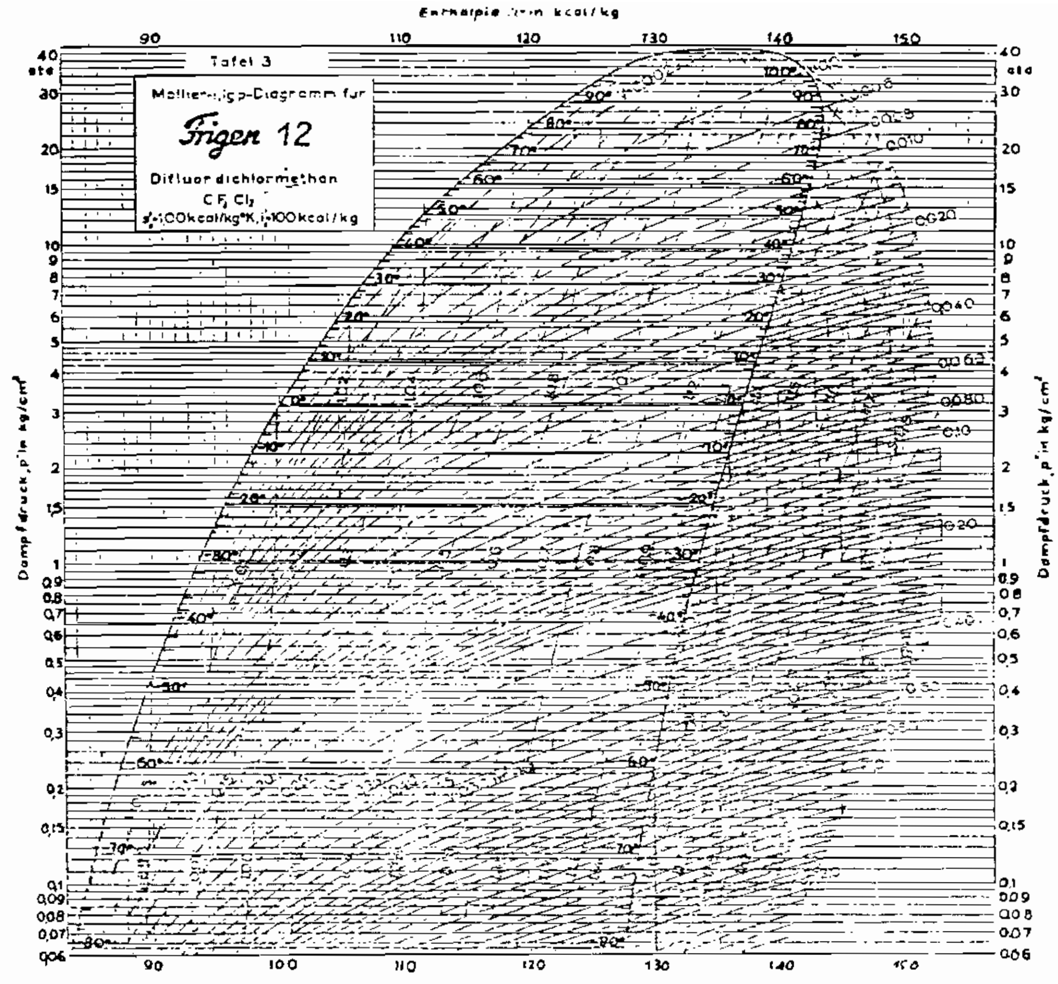
ملحق رقم (٧)

خرائط موائع التبريد

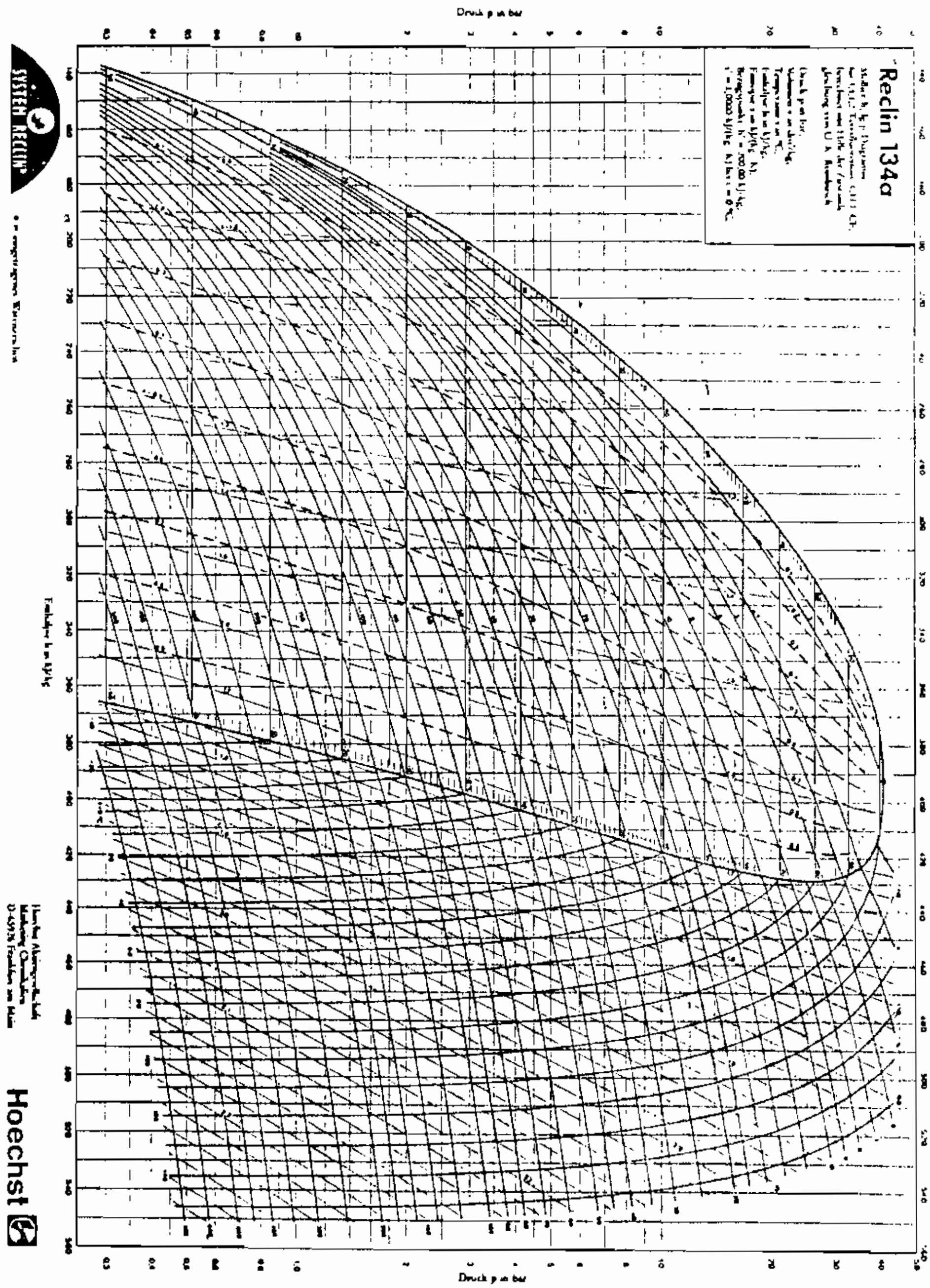
Charts of Fluid Refrigerants



Source :Refrigeration Charts, Collage of Engineering, Alexandria University, (1990).



Source :Refrigeration Charts, Collage of Engineering, Alexandria University, (1990).

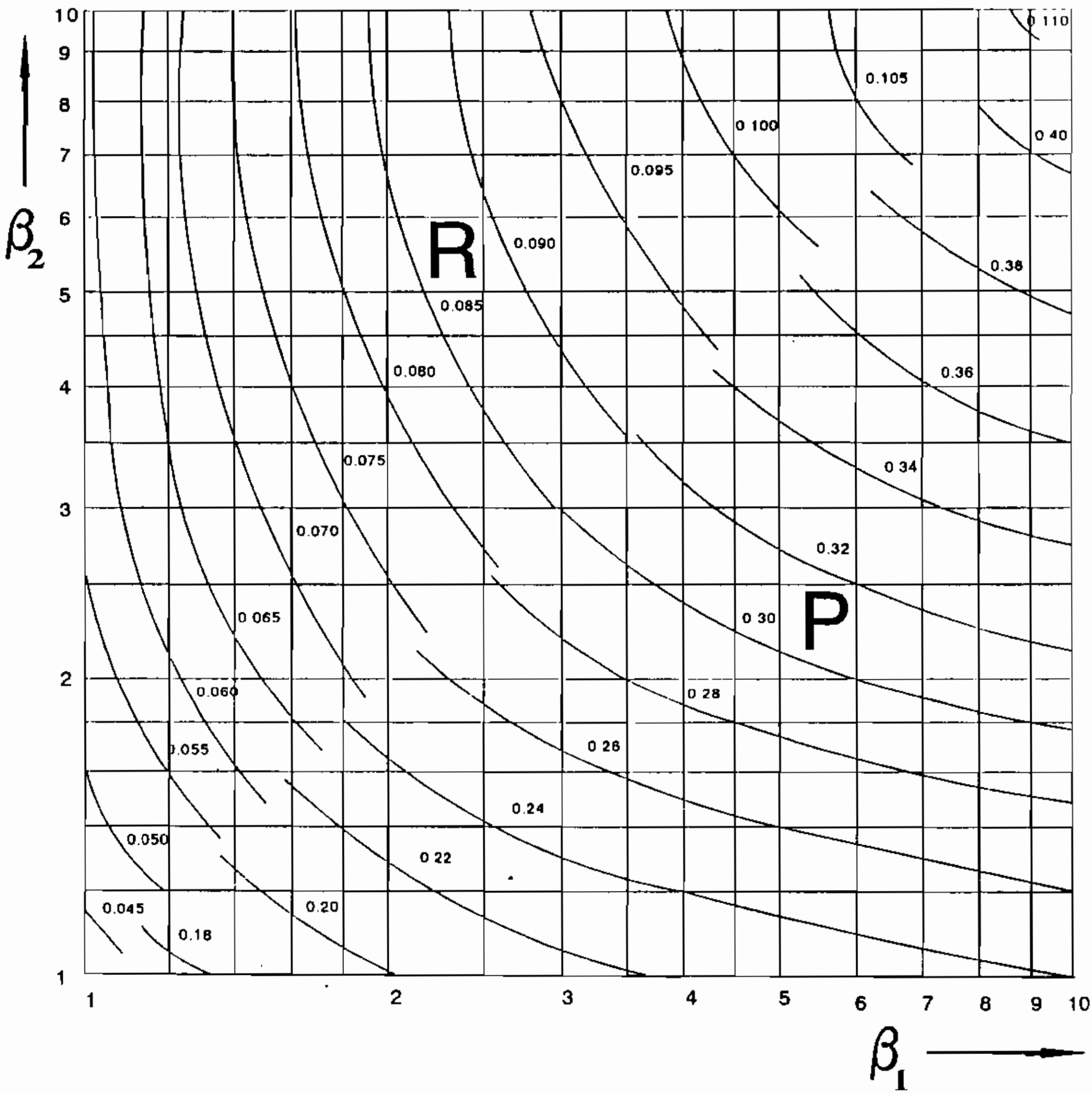


Source : Copyright Hoechst (1993)

ملحق رقم (٨)

خريطة ثوابت بلانك للتجميد

Chart For Constants Of Plank Freezing Equation



Source : Cited from Heldman and Singh (1981)

ملحق رقم (٩)

قائمة الرموز المستخدمه

List of Symbols

قائمة الرموز المستخدمه

A = مساحة مقطع او مساحة سطح

a = مساحة ، طول ، ثابت

B.H.P = القدرة الفرمليه للمحرك

B.T.U = وحدة حراريه بريطانيه

C = السرعه المتوسطة للجزيئات ، ثابت

C_p = الحراره النوعيه تحت ضغط ثابت

C_s = معامل التغير فى طاقة الحركة

C_v = الحراره النوعيه تحت حجم ثابت

C_y = معامل الطول الاضافى (زيادة الطول)

C.O.P = معامل اداء مضخة الحرارة أو الثلاجة

D = القطر

d = القطر ، السمك ، علامة التفاضل

D.B.T = درجة الحرارة الجافه

E = الطاقه ، معامل المرونه (معامل يانج)

e = نسبة الاشعاع الحرارى للجسم

F = القوه ، القوة الناتجة عن الاحتكاك

f_c = معامل الاحتكاك

GRe = رقم رينولدز العام

Gr = رقم جراشوف

g = عجلة الجاذبيه الأرضيه

g_c = ثابت الجاذبيه الأرضيه

H = الانثالبى او المحتوى الحرارى

ΔH = التغير الكلى فى الانثالبى

H P = القدرة الحصانيه

h = معامل انتقال الحراره بالحمل ، الانثالبى النوعى ، مقدار الرفع الكلى

h_f = الفقد فى الرفع

h_r = معامل انتقال الحراره بالأشعاع

h_s = الرفع الاستاتيكى

i = الحراره الكليه

$i_{D\&S}$ = الحراره الكليه لوحدة وزنيه من البخار الجاف والمشبع

$i_{S/H}$ = الحراره الكليه لوحدة وزنيه من البخار المحمص

i_{Wet} = الحراره الكليه لوحدة وزنيه من البخار الرطب

K = درجة كلفن ، معامل القوام ، ثابت التجفيف فى معادلة Page

KE = الطاقه الكينيتيكيه

k = معامل انتقال الحراره بالتوصيل أو الرمز للكيلو

L = الطول ، المسافه ، الحراره الكامنه للانصهار ، الحراره الكامنه للتبخر ، الحراره الكامنه للتجميد

l = الطول

M = الوزن الجزيئى ، المحتوى الرطوبى للمادة على الاساس الجاف

M_c = المحتوى الرطوبى الحرج

M_e = المحتوى الرطوبى الاتزانى (المتوازن)

M_D = المحتوى الرطوبى الابتدائى

MR = معدل التجفيف

m = الكتله ، عدد الجزيئات في وحدة الكتله ، المحتوى الرطوبى على الاساس الرطب ، المولاليه

$\dot{m}$ = المعدل الوزنى للسريان (معدل سريان الكتله)

N = عدد جزيئات الغاز فى وحدة الحجم ، سرعة الدوران ، ثابت تجريبى فى معادله Page

n = عدد لفات عمود الإدارة في وحدة الزمن ، دليل سلوك السريان ، اس منحنى الانضغاط والتمدد فى الإجراء البوليتروبى

Nu = رقم نوسيلت

P = الضغط المطلق للغاز ، الضغط البخارى ، ثابت فى معادلة بلانك

p = الضغط الجزيئى للغاز

ΔP = الفرق فى الضغط

PE = طاقة الوضع

P_r = رقم براندل

Q = كمية الحرارة اللازمه لتسخين الهواء ، معدل انتقال الحراره

R = الثابت النوعى للغاز ، ثابت فى معادلة بلانك

Re = رقم رينولدز

RH = الرطوبه النسبيه

R_o = الثابت العام للغازات

^oR = درجة رانكن

r = نصف القطر

S = الانتروبى النوعى

ds = التغيرفى الانتروبى

SI = النظام الدولى

T = درجة الحراره المطلقه

t = الوقت ، درجة الحراره

t_{sat} = درجة حرارة التشبع

Δt_m = الفرق المتوسط فى درجات الحراره

Δt_{lm} = المتوسط اللوغاريتمى للفرق فى درجات الحراره

U = الطاقه الداخليه ، المعامل الكلى المكافىء لانتقال الحراره

u = الطاقه الداخليه النوعيه

Δu = التغير فى الطاقه الداخليه

V = السرعه ، السرعه المتوسطة للسريان ، الحجم المولى للغاز

V = معدل السريان الحجمى

υ = الحجم النوعى ، الحجم الرطب

W = الشغل ، كمية الرطوبه المزاله فى وحدة الزمن ، الوزن

W_d = الوزن الجاف للمادة

W_m = وزن الرطوبه للماده

W_t = الوزن الكلى للمـــاده

W.B.T = درجة الحراره الرطبه

X = نسبة جفاف او جودة البخار ، المحتوى الرطوبى للهواء، نسبة تركيز السائل

x = المسافه ، السمك

α = معامل الانتشار الحرارى ، ثابت الانتشار الكلى فى حساب معدل التجفيف

β = معامل التمدد الحجمى (مقلوب درجة الحراره المطلقه للمائع)

γ = معدل القص ، النسبه بين C_p / C_v ، أس منحنى الانضغاط والتمدد فى الاجراء الادياباتيكى

Δ = الفرق

λ' = الحراره الكامنه للتبخر

λ = الحراره الكامنه للانصهار

η = الكفاءة أو الجودة

θ	=	الزمن
p	=	الكثافه
μ	=	اللزوجة ، معامل اللزوجه
μ_A	=	اللزوجة الظاهريه
σ	=	ثابت ستيفان - بولتسمان
π	=	النسبه التقريبيه
τ	=	الزمن ، اجهاد القص
Ω	=	عزم الدوران
ω	=	السرعه الزاويه